

CHRISTIANE C. WAGNER

**COLD SEEPS
AN KONVERGENTEN PLATTENRÄNDERN
VOR OREGON UND PERU:
BIOGEOCHEMISCHE
BESTANDSAUFNAHME**

GEOMAR
Forschungszentrum
für marine Geowissenschaften
der Christian-Albrechts-Universität
zu Kiel

Kiel 1996

GEOMAR REPORT 53

GEOMAR
Research Center
for Marine Geosciences
Christian Albrechts University
in Kiel



CHRISTIANE C. WAGNER

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der mathematisch-naturwissenschaftlichen Fakultät
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
Zum Druck genehmigt am 23.11.1994

Redaktion der Serie: Gerhard Haass
Umschlag: Kerstin Kreis, Harald Gross,
GEOMAR Technologie GmbH

Managing Editor: Gerhard Haass
Cover: Kerstin Kreis, Harald Gross,
GEOMAR Technologie GmbH

GEOMAR REPORT
ISSN 0936 - 5788

GEOMAR REPORT
ISSN 0936 - 5788

GEOMAR
Forschungszentrum
für marine Geowissenschaften
D-24148 Kiel
Wischhofstr. 1-3
Telefon (0431) 600-2555, 600-2505

GEOMAR
Research Center
for Marine Geosciences
D-24148 Kiel / Germany
Wischhofstr. 1-3
Telephone (49) 431 / 600-2555, 600-2505

1 Cold Seeps, Kenntnisstand und Fazies.....	2
1.1 Definition, Abgrenzung.....	2
1.2 Tektonisches Umfeld, Beziehung zu tektonischen Prozessen.....	4
1.3 Rolle in globalen Stoffkreisläufen.....	14
1.4 Offene Fragen.....	16

VORWORT

Einleitend zu dieser Arbeit sind einige Bemerkungen über den Sprachgebrauch notwendig. Bereits im Titel stellt der geneigte Leser fest, daß einzelne Begriffe der englischen Sprache entlehnt sind. Damit soll nicht modischen Strömungen Genüge getan werden, sondern es handelt sich um Fachbegriffe, die in der deutschen Sprache keine Entsprechung finden. Dies resultiert in erster Linie aus der Tatsache, daß die Fachliteratur fast ausschließlich in englischer Sprache verfügbar ist.

Unter kalten Sickerungen, oder heißen Ausströmungen ("cold seeps"/"hot vents") wird sich kaum jemand etwas vorstellen können. Deshalb wurden diese Begriffe übernommen und nach Einführung wie deutsche Substantive verwendet. Im Falle des Küstenauftriebs ("upwelling") wurde der englische Begriff gewählt, obwohl es eine deutsche Entsprechung gibt, da er einen bestimmten Prozeß unmißverständlich umschreibt.

Auch der Begriff Vent-Site, der eine ganz bestimmte, eng umgrenzte Lokalität in einem Vent-Gebiet umschreibt, wurde verwendet, um Mißverständnissen vorzubeugen. Er repräsentiert sozusagen die Untereinheit eines größeren Areals, die hier im Detail beschrieben ist.

Es ist also mein erklärtes Ziel durch Verwendung einzelner englischer Fachbegriffe das Verständnis des Textes zu erleichtern. Die Umweltbedingungen in den beschriebenen Gebieten sind kompliziert genug, so daß man auf sprachliche Komplikationen und Experimente mit eingedeutschten Begriffen verzichten kann.

7 Biogeochemische Implikationen des Fluid-Ventings.....	52
8 Zusammenfassung/Abstract.....	97
9 Literatur.....	99

ANHANG

Meßprogramme.....	II
Kurzbeschreibungen der Proben.....	IV
Datenanhang.....	IX

INHALT

1 Cold Seeps, Kenntnisstand und Fazies.....	2
1.1 Definition, Abgrenzung.....	2
1.2 Tektonisches Umfeld, Beziehung zu tektonischen Prozessen	4
1.3 Rolle in globalen Stoffkreisläufen.....	14
1.4 Offene Fragen.....	16
2 Vent-Biologie.....	18
2.1 Wachstum und Verbreitung von Organismen.....	18
2.2 Beschreibung der beprobten Vent-Sites.....	29
3 Diagnostische geochemische Parameter im Vent-Geschehen.....	33
3.1 Interpretation von Spurenelementdaten.....	38
3.2 "Inventur".....	41
3.3 Charakteristische Spurenelemente in Vent-Organismen.....	42
3.4 Signale stabiler Isotope.....	60
3.5 Charakteristika der Vent-Fluide.....	69
3.6 Synopse: Herkunft der Fluide.....	73
4 Regionaler Vergleich geochemischer Daten.....	75
4.1 Marginal Ridge.....	75
4.2 Marginal Ridge/Bioherm.....	77
4.3 Chiclayo/Paita/Chimbote.....	79
4.4 Vergleich der Vent-Gebiete vor Peru und Oregon.....	79
5 Zeitskala für Venting-Prozesse.....	82
6 Fluid-Venting: Kein kontinuierlicher Prozess.....	88
6.1 Aufzeichnungen in Muschelschalen und Wurmröhren.....	88
6.2 Vent-Fluide.....	90
6.3 Langfristige Beobachtungen in Vent-Gebieten.....	91
7 Biogeochemische Implikationen des Fluid-Venting.....	92
8 Zusammenfassung/Abstract.....	97
9 Literatur.....	99

ANHANG

Meßprogramme.....	II
Kurzbeschreibungen der Proben.....	IV
Datenanhang.....	IX

1 Cold Seeps, Kenntnisstand und Fazies

Im Zuge der Klimadiskussion einerseits und der Suche nach landfernen Rohstoffen andererseits, ist die Frage nach Stoffumsätzen im Ozean in den letzten Jahren zunehmend in das Blickfeld öffentlichen Interesses geraten. Dabei ist der Kohlenstoff-Kreislauf das bisher am besten untersuchte System, das verdeutlicht, daß der Ozean nicht als Gesamtsystem untersuchbar ist. Komplexe Zusammenhänge bedingen eine Einengung aller globalen Fragestellungen auf kleinere geographische Einheiten mit ähnlichen physikochemischen Bedingungen. Nur eine Berücksichtigung aller Spezialfälle, die Stoffumsätze erzeugen, kann verallgemeinernde Aussagen ermöglichen.

1.1 Definition, Abgrenzung

Eine dieser Einheiten stellen Vent-Gebiete dar. Darunter zu verstehen sind Gebiete, in denen Fluide aus dem Meeresboden ausströmen. Sie sind entweder tektonisch beeinflusst, oder induziert durch Kohlenwasserstoff-Lagerstätten im Untergrund. Im Gegensatz zu den "pockmarks", kraterförmigen Strukturen am Meeresboden, die ebenfalls durch Fluid-Austritte zustande kommen (HOVLAND & JUDD 1988), bilden Vents nicht zwangsläufig spezielle morphologische Strukturen. Venting infolge von Kohlenwasserstoffen im Untergrund wurde z.B. am Florida Escarpment (PAULL ET AL. 1984) und am Louisiana Slope (MAHLON ET AL 1985, BROOKS ET AL. 1987, CALLENDER & POWELL 1992) beobachtet und findet auch in anderen Schelf-Gebieten weite Verbreitung (HOVLAND & JUDD 1988). Da hier der Gasdruck die Fluidbewegungen stimuliert, sind keine Temperaturanomalien zu beobachten.

Die tektonisch gesteuerten Vents gliedern sich in an mittelozeanische Rücken gekoppelte "hot vents" und davon unabhängige "cold seeps" an Subduktionszonen. Beide Typen zeichnen sich durch anorganische Präzipitate aus, die als Krusten vorkommen oder Schornsteine bis zu mehreren Metern Höhe bilden können. An mittelozeanischen Rücken bestehen sie aus Sulfiden, Baryt und Anhydrit (EDMOND & VON DAMM 1983, RONA ET AL. 1986), an Kontinentalrändern aus Carbonaten (KULM ET AL. 1986) oder Baryten (DIA ET AL. 1993, TORRES). Die Anwesenheit von H_2S und/oder CH_4 als Nährstoffe für chemosynthetische Ernährung bedingt die Ansiedelung charakteristischer Biozönosen.

An Hot Vents treten heiße Wässer aus, die durch Konvektionsprozesse bei einem extremen geothermischen Gradienten an mittelozeanischen Rücken aufgeheizt werden. Ihre Sulfidfracht beziehen sie aus dem oberen Mantel. Die Cold Seeps können an Subduktionszonen in Folge konvergenter Plattenbewegungen auftreten. Austretende Fluide werden hier aus den Sedimenten ausgepreßt, um dem anhaltenden Druck durch die

Plattenbewegung entgegenzuwirken (KULM ET AL. 1986). Dies ist z.B. vor Peru und Oregon zu beobachten, den Arbeitsgebieten der vorliegenden Arbeit. Auch hier treten keine Temperaturanomalien auf. Die Bezeichnung Vent bezieht sich im folgenden auf die Untergruppe der Cold Seeps.

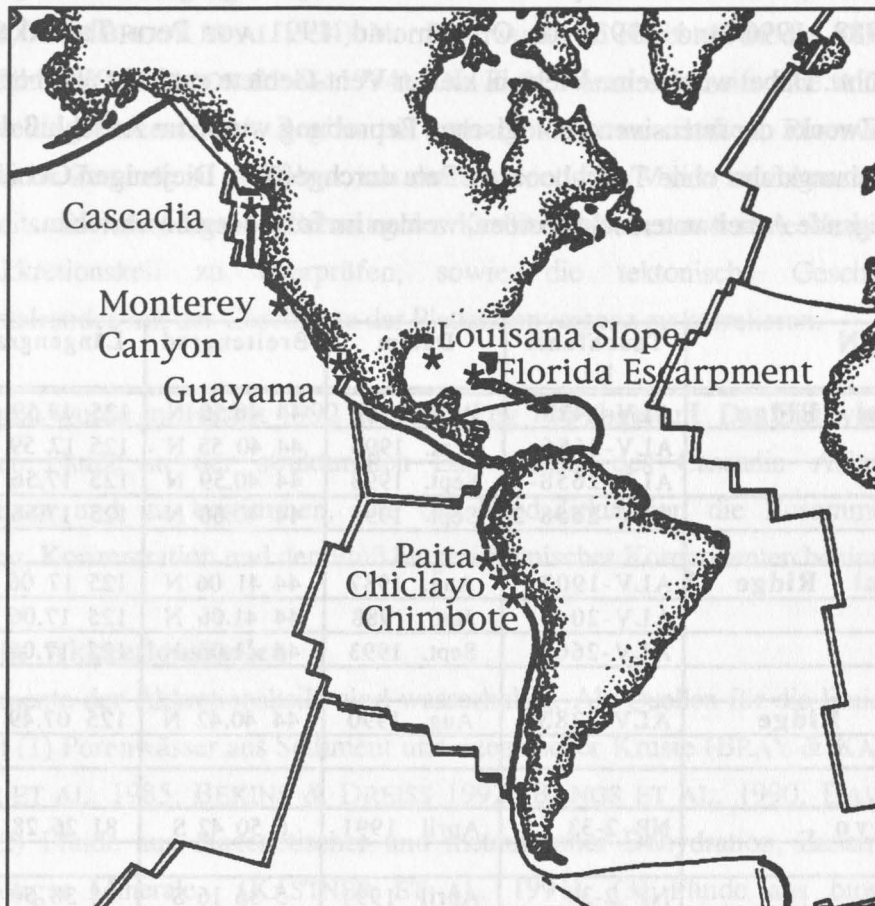


Abb. 1 Von *Alvin* besuchte Cold Seeps (nach LUTZ 1991/92)

Die Hot Vents wurden 1977 durch das amerikanische Tauchboot *Alvin* entdeckt (BALLARD 1977, CORLISS & BALLARD 1977, CORLISS ET AL. 1979, Rev. LUTZ, 1991/92), Cold Seeps (Abb. 1) dagegen erst im Jahre 1984 (KULM ET AL. 1986, SUESS ET AL. 1985). Letztere zeichnen sich aus durch eine dichte Besiedelung mit speziellen benthischen Organismen, hauptsächlich Mollusken, inmitten des relativ wenig besiedelten Tiefseebodens (JUNIPER & SIBUET 1987). Meist finden sich Krusten-bildungen als Präzipitate ausströmender Fluide. Extreme Ausstromraten sind z.T. direkt meßbar (LINKE ET AL. 1994). Es gibt jedoch Hinweise darauf, daß das Venting kein kontinuierlicher Prozeß ist. Direkte Beobachtungen über längere Zeiträume sind aus

technischen und finanziellen Gründen z.Z. nicht möglich, sind jedoch für die Zukunft auf jeden Fall anzustreben.

1.2 Tektonisches Umfeld, Beziehung zu tektonischen Prozessen

Im Rahmen internationaler Projekte zur Erforschung des Kontinentalhanges wurden 1984, 1988, 1990 und 1993 vor Oregon und 1991 vor Peru Tauchkampagnen durchgeführt. Dabei wurde eine Vielzahl kleiner Vent-Gebiete entdeckt und beprobt (Tab. 1). Zum Zwecke der intensiven geologischen Beprobung wurde im Anschluß daran 1992 eine Forschungsfahrt ohne Tauchboot vor Peru durchgeführt. Diejenigen Gebiete, die für die vorliegende Arbeit untersucht wurden, werden im folgenden beschrieben.

OREGON	Tauchfahrt Nr.	Datum	Breitengrad	Längengrad	Wasser- tiefe
Marginal Ridge 1	ALV-1428	Aug. 1984	44 40.55 N	125 17.59 W	2043m
	ALV-2656	Sept. 1993	44 40 55 N	125 17 59 W	2043m
	ALV-2658-1	Sept. 1993	44 40.59 N	125 17.56 W	2065m
	ALV-2658-2	Sept. 1993	44 40.60 N	125 17.56 W	2063m
Marginal Ridge 2	ALV-1907	Aug. 1987	44 41 06 N	125 17 06 W	1972m
	ALV-2046	Juni 1988	44 41.06 N	125 17.06 W	1972m
	ALV-2663	Sept. 1993	44 41.06 N	125 17.06 W	1972m
Second Ridge	ALV-2283	Aug. 1990	44 40.42 N	125 07.49 W	675m
PERU					
Chiclayo	NP 2-33	April 1991	6 50 42 S	81 26 28 W	4724
Paíta	NP 2-30	April 1991	5 36 16 S	81 38 50 W	3454m
	SO 78-177	März 1992	5 36.31 S	81 38.44 W	3423m
Chimbote	8506-25 DR	April 1991			
	SO 78-163	März 1992	9 34.99 S	80 08.08 W	3662m

Tab. 1 Beprobungsgebiete vor Peru und Oregon; ALV-*Alvin*-Tauchgang, NP-Nautiperc Expedition, SO 78-SONNE 78 Expedition, DR-Dredge

Beide Arbeitsgebiete der vorliegenden Untersuchung gehören dem gleichen Typus tektonischer Großstrukturen an. Sie befinden sich an konvergenten Plattenrändern mit ausgebildeter Subduktionszone. Dem eigentlichen Kontinentalhang ist ein Akkretionskeil vorgelagert, der aus Teilen der gestauchten Sedimentdecke der bereits subduzierten ozeanischen Platte aufgebaut ist. Tektonischer Stress entsteht durch die anhaltende

Plattenbewegung und äußert sich sowohl in diagenetischen Prozessen als auch in ausgedehnten Störungssystemen. Die geringe Stabilität des Komplexes äußert sich auch in großflächigen Rutschungen (BOURGOIS ET AL. 1993).

ODP-Bohrungen

In beiden Arbeitsgebieten wurden im Zuge des Ocean Drilling Projekt (ODP) Bohrungen abgeteuft, die u.a. Vorgänge in den Akkretionskeilen beleuchten sollten (VON HUENE ET AL. 1988, WESTBROOK ET AL 1994). Vor Peru wurde im Herbst 1986 das ODP Leg 112 durchgeführt (WESTBROOK ET AL 1994). Die Ziele waren einerseits eine Aufzeichnung der Upwelling-Prozesse seit Beginn bis zum Holozän zu erhalten, Porenwässer und diagenetische Zemente zu beproben, um das diagenetische Milieu zu rekonstruieren und andererseits die seewärtige Ausdehnung des Kontinentalfußes und seine Verbindung mit dem Akkretionskeil zu überprüfen, sowie die tektonische Geschichte des Kontinentalrandes mit der Geschichte der Plattenkonvergenz zu korrelieren.

Vor Oregon wurde im Herbst 1992 das ODP Leg 146 abgeteuft. Das Ziel war dabei die Rolle der Fluide in der strukturellen Entwicklung des Cascadia Akkretionskeils abzuschätzen und zu bestimmen, wie die Fluid-Zirkulation die Zusammensetzung, Verteilung, Konzentration und den Fluß biogeochemischer Komponenten beeinflusst.

Fluide in Akkretionskeilen

Die Sedimente der Akkretionskeile sind wasserhaltig. Als Quellen für die Fluide werden diskutiert (1) Porenwässer aus Sediment und ozeanischer Kruste (BRAY & KARIG 1985, FOWLER ET AL. 1985, BEKINS & DREISS 1992, BANGS ET AL. 1990, DAVIS ET AL. 1990); (2) Fluide aus diagenetischer und metamorpher Dehydration, Zusammenbruch wasserhaltiger Minerale (KASTNER ET AL. 1991); (3) Fluide aus biogener und thermogener Dekomposition organischen Materials (KASTNER ET AL. 1990, PEACOCK 1990, VROLJIK ET AL. 1990). Anhaltender Druck führt zur Entwässerung. Fluide können sowohl an stratigraphisch und tektonisch vorgezeichneten Entwässerungsbahnen entweichen als auch als diffuser Fluß über den gesamten Akkretionskeil verteilt austreten. Daraus resultiert eine meßbare Reduktion des Porenraumes im Sediment, der als Maß für den Wassergehalt der Sedimente dient. Welches Phänomen welchen Beitrag zum Gesamtgeschehen leistet wird kontrovers diskutiert und durch Modellrechnungen überprüft (Review: LE PICHON ET AL. 1993). Unterschiedliche Methoden der Annäherung an dieses Problem ergeben bislang noch Unterschiede von mehreren Dimensionen. Als gesichert können jedoch Flußraten von max. $490 \text{ lm}^{-2}\text{day}^{-1}$ vor Peru und max. $1765 \text{ lm}^{-2}\text{day}^{-1}$ vor Oregon gelten (LINKE ET AL 1994). Diese Flußraten wurden durch *in situ* Messungen über mehrere Stunden ermittelt und stellen eine Momentaufnahme dar, die keine Rückschlüsse auf die zeitliche Entwicklung des Fluid-

Venting zuläßt. Um die Diskrepanz zwischen *in situ* Messungen und Abschätzungen aus seismischen Daten zu überbrücken sind verschiedene Lösungen möglich:

- Diskontinuität des Fluidausstroms
- Existenz von Senken für bodennahes Meerwasser, das sich mit Vent-Fluiden mischt (Recharge-Zonen, KASTNER ET AL. 1990, 1991).

Beide Ansätze sind bisher hypothetisch.

Cascadia Subduktionszone

Die Cascadia-Subduktionszone ist seit dem Eozän ein Gebiet konvergenter Plattenbewegung. Dabei wurde zunächst die Kula/Farallon und inzwischen die Juan de Fuca Platte unter die Nordamerikanische Platte subduziert (RIDDIHOUGH 1984, DUNCAN & KULM 1989, DEMETS ET AL. 1990). Die jetzige Subduktionsphase begann im späten Miozän und führte durch ostwärts gerichtete Bewegung zur Akkretion der Sedimente des Cascadia-Beckens (SNAVELY 1979, DUNCAN & KULM 1989).

Die Subduktion der 8 Mio. Jahre alten ozeanischen Kruste, die von mächtigen Sedimenten überlagert wird, bewirkte gut ausgebildete Falten und Überschiebungen im unteren Akkretionskeil (MACKAY ET AL. 1992). Die Subduktionszone vor Oregon ist gekennzeichnet durch die Abwesenheit eines bathymetrischen Grabens. Die Sedimentation ist charakterisiert durch hohen Eintrag klastischen, terrigenen Materials. Extrem hohe Sedimentationsraten im Plio-/Pleistozän haben alle topographischen Unebenheiten ausgeglichen. Die aktive Spreizungszone des Juan de Fuca Ridge bildet eine natürliche Barriere für den Sedimenttransport in die Tiefsee. Die kontinentale Sedimentfracht sammelt sich daher im vorgelagerten Cascadia-Basin, das Sedimentmächtigkeiten bis 3,5 km (MOORE 1991) aufweist. Der durch Subduktion entstandene Akkretionskeil ist entsprechend gut ausgebildet.

Der hier aktive Akkretionskeil ist der jüngere Teil eines größeren Subduktionskomplexes, der auch an Land befindliche paläogene und neogene Anteile umfaßt (SNAVELY ET AL. 1980).

Die Auswertung des ODP Leg 146 ergab im Kontinentalhang vor Oregon drei strukturelle Bereiche (WESTBROOK ET AL. 1994), die eine zunehmende tektonische Beanspruchung repräsentieren. Während im Bereich I die Anwesenheit von Störungen vermutlich lithologisch kontrolliert ist, treten im Bereich III bereits Schieferungskörper in der Dimension von 1-5 mm auf. Unterstützt durch tektonischen Druck setzt eine zunehmende Verfestigung der Sedimente nach unten ein. In verschiedenen Kernen, die nur wenige Zehnermeter auseinander liegen, zeigt sich eine hohe Variabilität. In den oberen Metern (bis 68 m) können Gashydrate auftreten, diese Zonen sind stark gestört.

Die Kompaktion der Sedimente im Akkretionskeil führt zu Entwässerungs-Phänomenen. Seismische Profile belegen die Anwesenheit einer seewärts gerichteten Hauptstörung, die die Kanalisation austretender Fluide bewirkt (MCKAY ET AL. 1992). An ihrem Austritt konnten Flußraten von bis zu $1765 \text{ l m}^{-2} \text{ d}^{-2}$ (LINKE ET AL. 1994) gemessen werden. Aus der Kompaktion der Sedimente über mehrere Profillinien wurden wesentlich geringere Ausstromraten ermittelt (VON HUENE), die die Entwässerung des gesamten Komplexes unabhängig von der Tektonik beschreiben.

Mehrere durch biologische Aktivität gekennzeichnete aktive Gebiete (Abb. 2) befinden sich in unterschiedlichen Bereichen des Akkretionskeils und werden direkt von Störungen im Untergrund gespeist (LEWIS & COCHRANE 1990, MOORE ET AL. 1990). Danach ist die oberflächliche Verteilung der Vent-Gebiete eine direkte Folge des strukturellen Aufbaus des Akkretionskeiles.

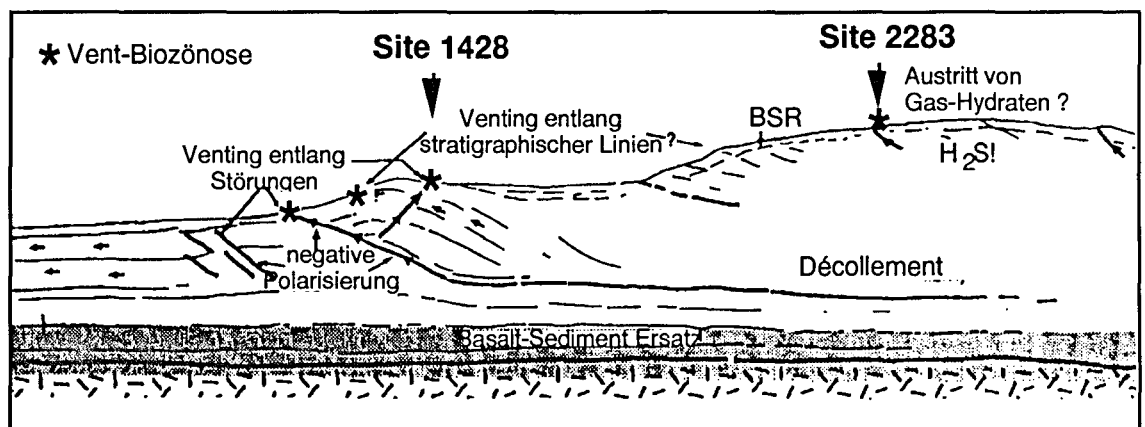


Abb. 2 Struktureller Aufbau des Cascadia-Akkretionskeils nach MOORE (1991)

Ein spezielles Ziel des ODP Leg 146 war es Fluidzirkulation *in situ* aufzuzeichnen. Zur Beobachtung über längere Zeiträume wurde erstmals ein Bohrloch (Site 892, Abb. 3) nicht verschlossen, sondern bis in 146 m Tiefe verrohrt und mit einer Bohrlochversiegelung (CORK) versehen (WESTBROOK ET AL. 1994). In dem Bohrloch hängende Thermistorketten sollten langfristige Aufzeichnungen der Druckentwicklung im Bohrloch ermöglichen, verschiedene Ventile dienen der späteren Beprobung des Porenwassers im Bohrloch.

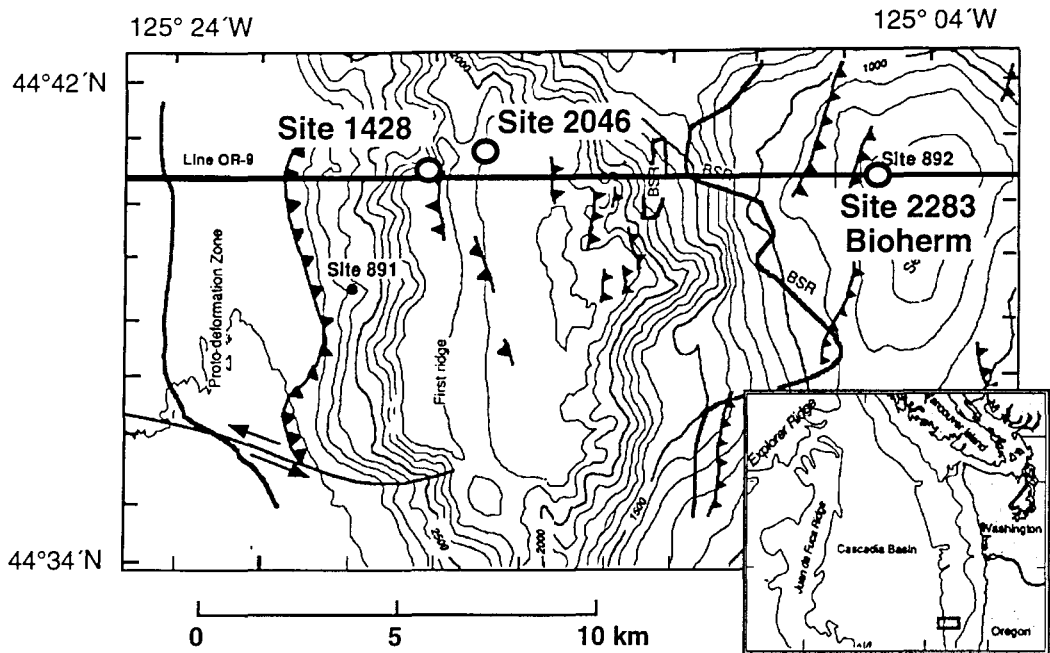
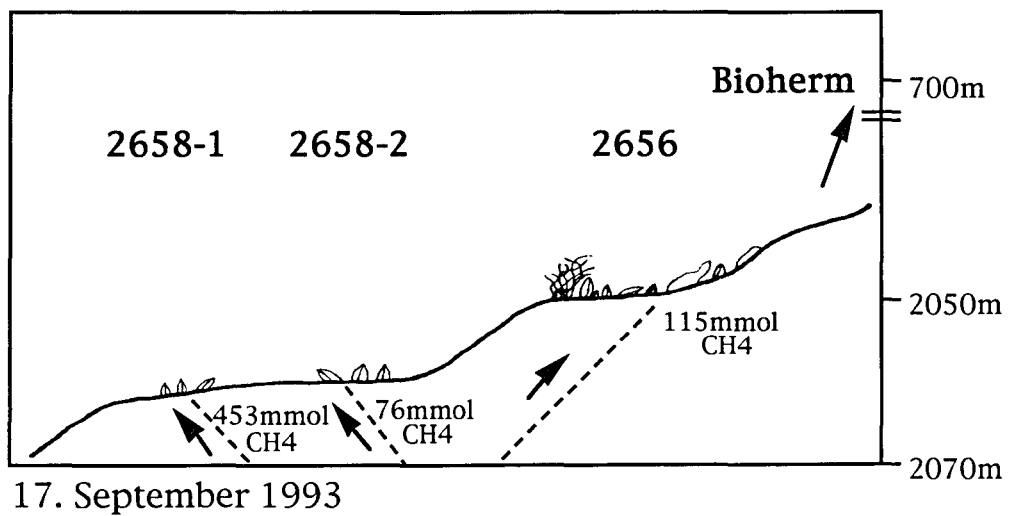
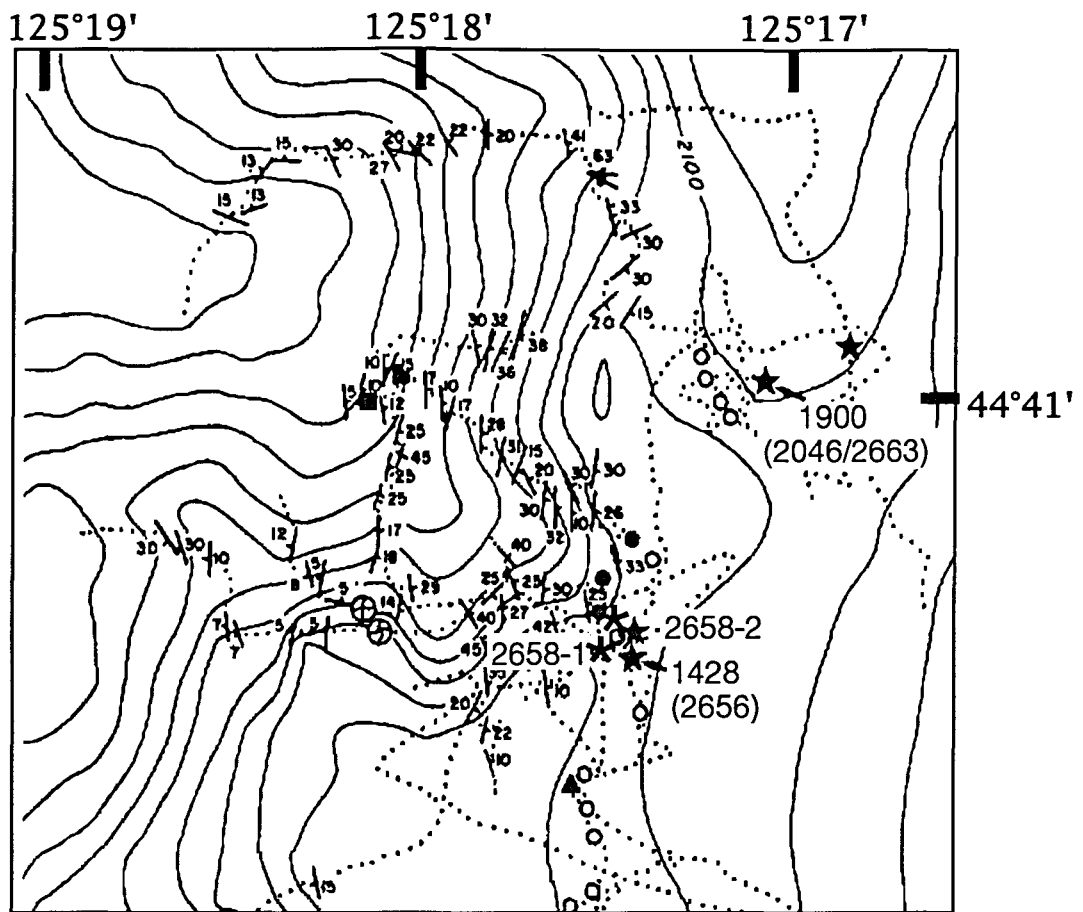


Abb. 3 Überblick über die Stationsgebiete vor Oregon

Im Bereich der Cascadia-Subduktionszone wurde eine Vielzahl von Tauchgängen durchgeführt (Abb. 4).

Marginal Ridge

Das als Marginal Ridge bezeichnete Vent-Gebiet liegt am unteren Kontinentalhang vor Oregon. Durch den Austritt der oben beschriebenen "back-thrust"-Verwerfung soll dieses Gebiet entwässert werden. Es weist mehrere einzelne Organismenvergesellschaftungen auf, die jeweils einen der kleinen Absätze des steilen Hanges besiedelt haben. Site 1428 wurde bereits 1984 entdeckt und konnte 1993 wiedergefunden und erneut beprobt werden. Zusätzlich wurden 1993 zwei weitere Sites, 2658-1 und 2658-2, entdeckt, die wenige Zehnermeter entfernt, unterhalb Site 1428 liegen. Es ergibt sich dadurch eine perlschnurartige Aufreihung der einzelnen Vents entlang des Hanges (Abb. 5).



Die drei Gebiete zeigen oberflächlich keine Verbindung zueinander, sind aber wahrscheinlich Bestandteil desselben hydrologischen Systems. Am Hang bilden Seesterne den Hauptbestandteil der benthischen Fauna. Es wurden weder ganze noch Bruchstücke von Schalen zwischen den einzelnen Gebieten gefunden.

Ein weiteres Gebiet aktiven Ventings wurde 1988 (Site 1900) entdeckt und 1989 (Site 2046) und 1993 (Site 2663) beprobt. Es liegt nordöstlich von 1428. Obwohl Site 1428 und 2046 nahe beieinander liegen, weisen sie große Unterschiede im geochemischen Milieu auf. Nur bei 2046 wurde Schwefelwasserstoff (H_2S) beobachtet. An beiden Sites tritt Methan (CH_4) aus. Nach der Interpretation von MOORE & ORANGE (1990) wird davon ausgegangen, daß beide Gebiete aus derselben Quelle gespeist werden. Da aber eine Differenzierung der Fluide oder das Vermischen mit einer zweiten Quelle unwahrscheinlich ist, ist von zwei Fluid-Systemen auf engem Raum auszugehen. Die Annahme wird unterstützt durch Ergebnisse geochemischer Analysen der Vent-Organismen (s. Kapitel 3).

Second Ridge

Dieses Gebiet ist in der Literatur als "bioherm" bekannt (MOORE 1991). Es liegt auf dem 2. Rücken im oberen Teil des Kontinentalhangs. Massige Carbonatbrocken mit mehreren Metern Durchmesser erzeugen die Struktur einer riesigen Schutthalde (Tafel 1). Die Carbonatbrocken bestehen z.T. aus bis zu 50% Molluskenschalen. Andere weisen äußerlich keine biogenen Spuren auf. Sediment ist nur in den Zwischenräumen vorhanden. Extreme H_2S -Anreicherungen (bis 10.000 ppm) sind während der ODP-Bohrung 1992 in oberflächennahen Sedimenten beobachtet worden (WESTBROOK ET AL. 1994). Der Second Ridge bildet die Typ-Lokalität des H_2S -führenden Fluid Systems. Dieses System wird vermutlich hangabwärts bei 1900 angezapft. Es zeigt sich darin eine enge Verzahnung unterschiedlicher Komponenten des Gesamtsystems.

Peru

Vor Peru ist im Gegensatz zu Oregon nur ein kleiner Akkretionskeil von bis 15 km Breite mit Mächtigkeiten bis 150 m ausgebildet. Die Schichtfolgen reichen von Pleistozän bis mittleres Eozän an der Basis (KEMP & LINDSLEY-GRIFFIN 1990). Insgesamt ist der Kontinentalhang gekennzeichnet durch massige Rutschungen, die vermutlich Tsunamis vor 13,8+-2,7 kyr bewirkt haben (BOURGOIS ET AL. 1993). Nach BOURGOIS ET AL. (1988) und VON HUENE (1989) weist der Kontinentalhang vor Peru zwei große Störungssysteme auf, die als Entwässerungsbahn für Fluide aus dem Akkretionskeil fungieren. Ausführliche geologische und geophysikalische Studien am Kontinentalhang vor Peru (KULM ET AL. 1981, THORNBURG 1985, VON HUENE ET AL. 1985, BOURGOIS ET AL. 1988, 1990, 1993) ergaben eine Gliederung des Hanges in drei strukturelle

Einheiten; den oberen, mittleren und unteren Hang. Der obere Hang wird dabei vom mittleren durch eine hangparallel streichende Abrißfläche getrennt. Diese erreicht eine Höhe von ca. 100 m bei Chimbote und 400-700 m im Gebiet Paita. Dadurch werden Sequenzen des oberen Miozän bis Pliozän am mittleren Hang freigelegt (BOURGOIS ET AL. 1993, VON HUENE 1989, Abb. 6).

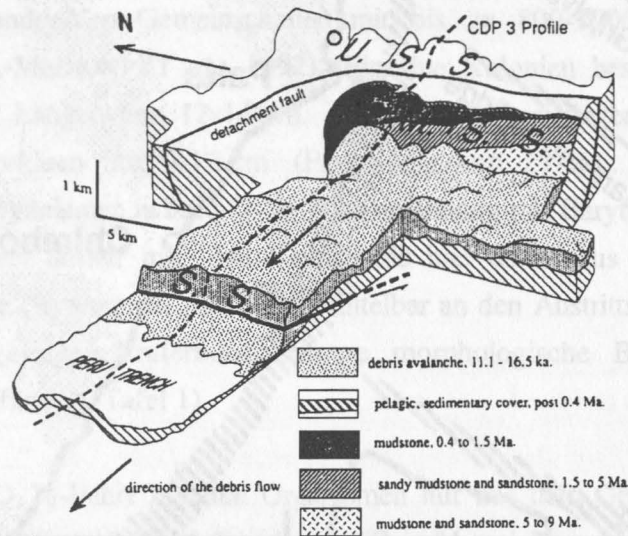


Abb. 6 Blockbild des Kontinentalhanges vor Peru (BOURGOIS 1993)

Die Auswertung des ODP Leg 112 vor Peru zeigte geochemische Besonderheiten auf, die auf Entwässerungsphänomene schließen ließen (KASTNER ET AL. 1990, VON BREYMAN ET AL. 1990). Gashydrate wurden z.T. direkt beobachtet und z.T. vermutet und wiesen auf Methan in oberflächennahen Schichten hin (KVENVOLDEN & KASTNER 1990).

Die hier beobachteten Vent-Gebiete wurden erst 1991 von dem französischen Tauchboot *Nautilie* entdeckt. Sie befinden sich an den beschriebenen Abrißflächen großer Rutschungen und damit im Gegensatz zur Cascadia-Subduktionszone nicht im Akkretionskeil.

Vor Peru wurden in drei regionalen Einheiten Vent-Gebiete beprobt (Abb. 7).

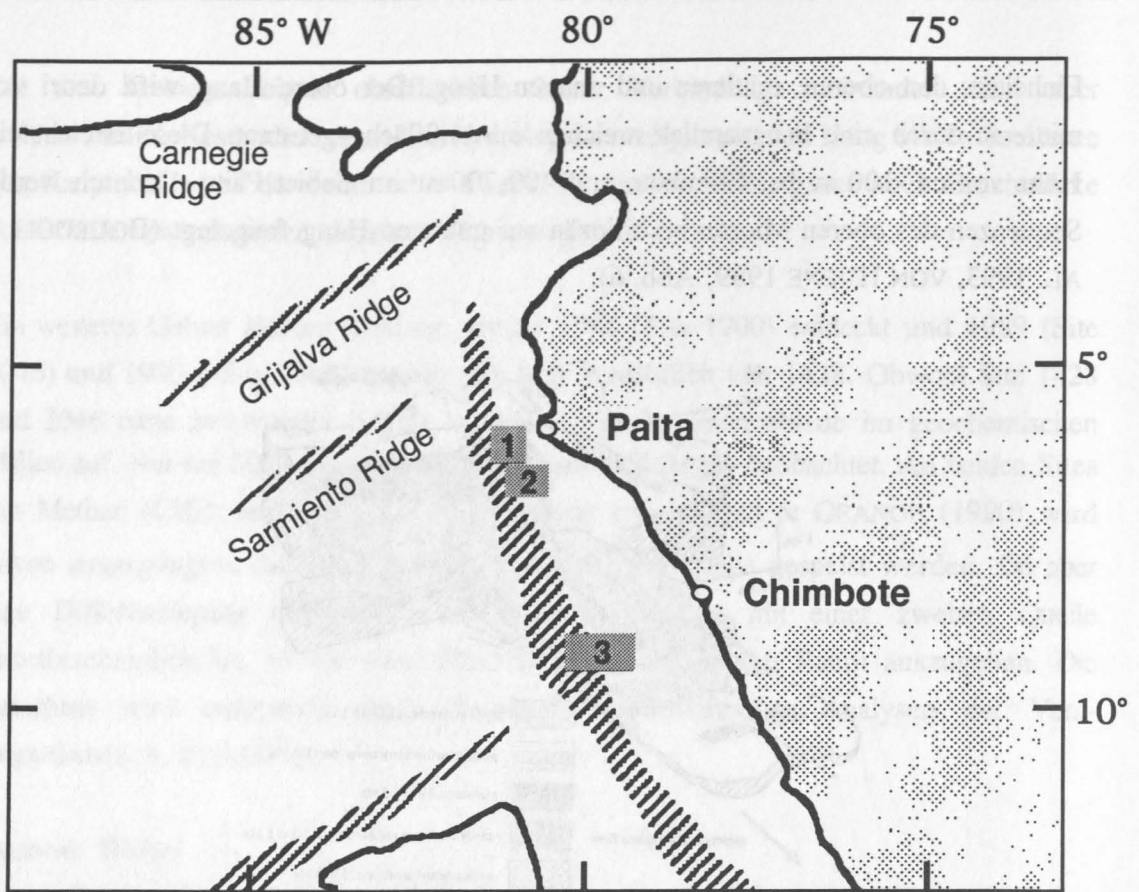


Abb. 7 Beprobungsgebiete vor Peru; 1-Paita, 2-Chiclayo, 3-Chimbote

Chiclayo

Der Chiclayo-Canyon bildet einen tiefen, schmalen Einschnitt in den Schelf vor Peru. Mit von 300 m auf 5500 m ansteigenden Wassertiefen auf einer Breite von nur wenigen Seemeilen bietet er ideale Voraussetzungen für den Austritt von Fluiden an der Diskordanz zwischen Basement und sedimentärer Folge, die hier nicht durch Konvergenz gekennzeichnet ist. Im Zuge der NAUTIPERC-Expeditionen (Frühjahr 1991) wurden Vent-Kolonien am nordwestlichen Hang entdeckt und beprobt. Eine Beprobung der Wassersäule erfolgte im Frühjahr 1992 auf der Forschungsfahrt SONNE 78.

Im Chiclayo-Canyon wurde ein Methanmaximum gemessen, das in der Tiefe mit der Lage der Organismen-Gemeinschaften übereinstimmt (FAHRTBERICHT SO 78). Es kann also davon ausgegangen werden, daß hier nach wie vor aktives Venting stattfindet.

Paita

Als Paita 1 wird ein Gebiet von 2x3 Seemeilen Größe am westlichen Kontinentalfuß vor Peru bezeichnet (FAHRTBERICHT SO 78). Die Wassertiefe beträgt ca. 5000 m. Dieses Gebiet im Bereich der Subduktionszone der ozeanischen Nazca-Platte und der kontinentalen südamerikanischen Platte, ist, wie der Chiclayo-Canyon, seit 1991 als aktives Vent-Gebiet bekannt. Das Untersuchungsgebiet liegt etwas oberhalb des

Subduktionskontaktes im Bereich des Akkretionskeils an einem steilen Hang. In diesem Gebiet wurden Video-Beobachtungen durchgeführt (FAHRTBERICHT SO 78).

Das Untersuchungsgebiet Paita 2 ist ebenfalls aus den NAUTIPERC-Expeditionen von 1991 bekannt. Es erstreckt sich auf der nach Süden einfallenden Rutschfläche am mittleren Kontinentalhang in ca. 3400 m Wassertiefe. In diesem Gebiet wurden große, zusammenhängende Vent-Gemeinschaften mit bis zu 800-1000 Individuen pro m² entdeckt (FIALA-MEDIONI ET AL. 1992). Einzelne Kolonien bestehen aus ca. 80-100 Organismen mit Längen von 12-16 cm. In sehr dicht besiedelten Gebieten beträgt die Länge der Individuen nur 4-12 cm (FIALA-MEDIONI ET AL. 1992). Das massive Auftreten von Organismen in Paita 2, in Zusammenhang mit Baryt-Ausfällungen (DIA ET AL. 1992), deutet darauf hin, daß Vent-Fluide hier direkt aus dem Kontinentalhang austreten und die Organismen sich nur unmittelbar an den Austrittsstellen formieren, auch wenn sie in geringer Entfernung bessere morphologische Bedingungen für eine Besiedelung vorfinden (Tafel 1).

Während der SO 78-Fahrt konnten Organismen nur aus dem Gebiet Paita 2 geborgen werden. Dieses Gebiet wird im folgenden als "Paita" bezeichnet.

Chimbote

Das Arbeitsgebiet Chimbote ist durch eine flachere Morphologie gekennzeichnet, als Chiclayo und Paita. Auch wenn hier sowohl bei den NAUTIPERC-Expeditionen, als auch während SO 78 große und zusammenhängende Vent-Biozönosen beobachtet wurden, fällt dieses Gebiet, aus tektonischer Sicht, aus dem Rahmen.

Die Muschelfelder wurden oberhalb der seewärts gerichteten Hauptstörung gefunden, die als hauptsächliche Entwässerungsbahn für Fluide aus dem Kontaktbereich von Basement und überlagernden Eozän-Miozän Sedimenten angenommen wird. Somit steht also die postulierte Quelle nicht zur Verfügung, denn wie im Gebiet Paita 2 eindrucksvoll bewiesen, siedeln die Organismen nur unmittelbar am Fluidaustritt. In diesem Gebiet wurden ölhaltige Gesteine gedredgt, die darauf schließen lassen, daß Ansammlungen von Kohlenwasserstoffen, vermischt mit Bodenwasser, die Quelle des Venting bilden. Entsprechend wäre das Venting hier unabhängig vom Akkretionskeil, der an dieser Stelle sowieso eine Mächtigkeit von nur 150 m hat, und wird direkt aus dem Kontinentalfuß gespeist (FAHRTBERICHT SO 78).

1.3 Rolle in globalen Stoffkreisläufen

Die globalen Stoffflüsse im Ozean werden in erster Linie durch den Eintrag von Flüssen und durch atmosphärische Deposition bestimmt. Hier liegen die Quellen vieler Elemente, die z.T. über lange Zeiträume in der Wassersäule verbleiben. Durch die Erforschung mittelozeanischer Rücken und damit in Zusammenhang stehender hydrothermaler Vent-Gebiete kam eine weitere Einflußgröße hinzu. Die "hot-vents" agieren für einige Elemente als Quelle, für andere als Senke. Durch die Reaktion mit Basalt bei hohen Temperaturen werden z.B. Ba und Li ausgewaschen und in der Wassersäule angereichert. Erzbildende Elemente tragen hingegen zur Mineralisation an den "hot-vents" bei (Review: LUTZ 1991/92).

Der Einfluß der "Subduktions-" oder "sedimentären Vents", auch Cold Seeps genannt, bei denen keine Temperaturerhöhung durch die austretenden Fluide zu beobachten ist, ist bisher in Einschätzungen der Stoffflüsse nicht eingegangen. Da diese Gebiete noch am Beginn ihrer Erforschung stehen, war dies bisher auch nicht möglich. Auf einer Länge von 60.000 km aller Plattengrenzen der Erde finden konvergente Plattenbewegungen statt (PARSONS 1981). Dabei kommt es auf 22.000 km Länge zur Ausbildung eines Akkretionskeiles in Abhängigkeit von der Sedimentzufuhr. In allen diesen Gebieten sind Venting-Erscheinungen zu erwarten. Die Rolle der Cold Seeps in globalen Stoffkreisläufen ist bisher völlig ungeklärt. Daß sie überhaupt von Bedeutung sind, deutet sich in verschiedenen Prozessen an, die für das Tiefseemilieu untypisch sind: (1) Extremer Aufbau von Biomasse in eng umgrenzten Gebieten, (2) hohe Konzentrationen von Spurenelementen in Organismen und Krustenbildungen, (3) extremer Fluidausstoß. Da Subduktions-Vents an allen der sich über 22.000km Länge erstreckenden Akkretionskeile (VON HUENE & SCHOLL 1991) zu erwarten sind, ist diesen Gebieten in künftigen Modellrechnungen sicher Beachtung zu schenken. Die Quantität der Stoffflüsse in den einzelnen Gebieten hängt natürlich von dem in den Sedimenten festgelegten Potential ab. Dabei spielen sowohl die Lithologie, die die Wasserhaltekapazität bestimmt, als auch die Produktivität in der oberen Wassersäule eine Rolle.

Die Untersuchungsgebiete vor Peru und Oregon sind klassische Küsten-Auftriebs-("coastal upwelling"-) Gebiete. Durch saisonale Zirkulationsänderungen gelangen nährstoffreiche Wässer aus dem mittleren Wasserkörper an die Oberfläche. Dadurch tritt erhöhte Primärproduktion auf, deren Abbau eine erhöhte Sauerstoffzehrung und damit die Ausbildung einer Sauerstoff-Minimum-Zone bedingt. Die in den Minimum-Zonen abgelagerten Sedimente stellen Senken für organische Verbindungen aller Art dar und hemmen damit auch die Regeneration der gebundenen Spurenelemente durch schnelle

werden ebenfalls angereichert, da die Regenerationszyklen durch mangelnde biologische Aktivität unvollständig sind.

Vor Peru sind alle Merkmale des Upwelling stark ausgeprägt. Die Sedimente weisen die klassische Upwelling-Fazies auf, d.h., sie sind reich an organischem Kohlenstoff und weisen hohe Gehalte an Nährstoffe gebundener Spurenelemente, insbesondere Barium, auf. In dem Untersuchungsgebiet vor Oregon mildert ein hoher Schwebstoffeintrag aus dem Columbia-River die Signale deutlich ab (KRISSEK & SCHEIDEGGER 1983). Die Sedimentfazies wird dominiert durch den Eintrag vulkanogener, lithiumreicher Schwebstoffe. Insgesamt stehen die Upwelling-Faktoren in einem Verhältnis von ca. 1:3, d.h. die Auswirkungen der hydrographischen Bedingungen sind vor Peru dreimal größer als vor Oregon (Tab. 2).

	Peru	Oregon
Primärproduktion [$\text{gC/m}^2\text{d}$]	0,8	0,3
O ₂ -Minimum [ml/l]	0,25	0,6
Schwebstoffeintrag $\times 10^6$ [t/yr]	5	15

Tab. 2 Upwelling Merkmale nach KRISSEK & SCHEIDEGGER 1983

Die Geochemie der Sedimente in den bearbeiteten Gebieten ist als direkte Konsequenz aus den hydrographischen Bedingungen anzusehen. Schichtkomplexe aus vom Upwelling gezeichneten Sedimenten stellen die Quelle für Vent-Fluide und deren Inhaltstoffe dar. Während vor Peru die "Reinform" dieser Bedingungen vorliegt, tritt vor Oregon zusätzlich eine Verdünnung durch hohen Schwebstoffeintrag ein. Die Schwebstoffe sind vulkanogen dominiert, da die Haupt-Quelle, der Columbia-River, die vulkanischen Kaskaden entwässert.

Die Vermutung, daß Vent-Gebiete möglicherweise einen nicht unerheblichen Beitrag zu globalen Stoffkreisläufen leisten, beruht auf direkten Beobachtungen. Extrem hohe Gehalte des Treibhausgases Methan (CH_4) wurden in Vent-Wässern nachgewiesen (LINKE ET AL. 1994, LAMMERS 1994), Krustenbildungen (Carbonat und Baryt) als Präzipitate ausströmender Fluide zeugen von Massenbewegungen (MOORE 1991, TORRES ET AL. subm.). Wie die vorliegende Arbeit zeigt, sind an diesen Vents phasenweise erhebliche Elementanreicherungen in den Hartteilen von Organismen zu beobachten, die auf die Veränderlichkeit des Milieus schließen lassen.

Die Cold Seeps finden sich in aktiven tektonischen Gebieten. An der Westküste des gesamten amerikanischen Kontinents ereignen sich immer wieder starke Erdbeben infolge von Subduktionsprozessen. Die Vorgänge an den Akkretionskeilen sind nicht die Ursache dafür (VON HUENE & SCHOLL 1991), Stofftransporte an Cold Seeps sind aber in jedem Fall als Randerscheinungen der großen Massenbewegungen, durch Subduktion und andere tektonische Ausprägungen konvergenter Plattenbewegungen, anzusehen. Eine Abschätzung ihres Anteils kann nur über die Erforschung der Vent-Fluide erfolgen, da sie die Grundlage für alle spezifischen biogenen und abiogenen Vorgänge an Vents bilden.

Der Aufbau organischer und anorganischer Substanz reflektiert das chemische Inventar am Entstehungsort. Geochemische Charakteristika bestimmen die Fazies, die das Resultat des Zusammenwirkens unterschiedlicher Kräfte ist. Die Organismen zeichnen die sie umgebenden Milieubedingungen in ihren Hartteilen auf. So repräsentiert jedes Individuum ein Abbild seiner Umgebung über den Zeitraum seines Lebens. Die Untersuchung von Spurenelementen und Verhältnissen stabiler Isotope an den Organismen stellen daher ein probates Mittel dar, sich dem Chemismus und der Herkunft der Fluide anzunähern.

1.5 Offene Fragen

Die Prozesse an Vent-Gebieten werfen eine Vielzahl von Fragen auf. Die wichtigste ist dabei die nach der Zeitskala für Venting-Prozesse. Über eine zeitliche Klassifizierung der einzelnen Prozesse wird auch die Frage nach dem genetischen Zusammenhang und globalen Auswirkungen eingegrenzt. Eine Zeitskala kann auf zwei Ansätzen beruhen:

1. Tektonischer Ansatz: Die Bearbeitung seismischer Profilschnitte gibt Hinweise auf den strukturellen Aufbau der Akkretionskeile. Abschätzungen über Stoffflüsse erfolgen über physikalische Eigenschaften des Sediments. Die sukzessive Veränderung der Sedimentbeschaffenheit durch Reduktion der Porenräume wird Entwässerungsphänomenen zugeschrieben. Durch modellhafte Entzerrung gestauchter Profile wird eine Abschätzung des bereits subduzierten Plattenanteils möglich, dessen Sedimente den Akkretionskeil bilden. Der zeitliche Verlauf der Prozesse kann indirekt abgeleitet werden. Nur langanhaltende Prozesse, oder solche mit extremen Auswirkungen, sind erfaßbar.

2. Biogeochemischer Ansatz: Dieser Ansatz geht von einer engen Verknüpfung von Venting-Prozessen mit biologischen Prozessen aus. Über die Lebensspanne von Organismenvergesellschaftungen und einzelnen Individuen erfolgt mit Hilfe geochemischer Analytik eine hochauflösende Beschreibung der Prozesse. Der biogeochemische Ansatz wird in der vorliegenden Arbeit erstmals durchgeführt. Dabei stehen folgende Fragen im Vordergrund:

- In welchem Zusammenhang stehen Spurenelementverteilungen und Isotopensignale in biogenen Hartteilen mit dem Vent-Geschehen?
- Sind Aussagen über die Lebensdauer von Vents möglich?
- Ist das Venting ein kontinuierlicher Prozeß?
- Welche Spurenelemente/stabile Isotopen sind von Bedeutung?
- Wie sind die Wachstumsgeschwindigkeiten von Vent-Organismen?

Zur Beantwortung dieser Fragen werden in der vorliegenden Arbeit *in situ* Beobachtungen und Messungen aus Tauchgängen mit *Alvin* und *Nautilie* mit analytischen Labormethoden verknüpft, um ein zusammenhängendes Bild zu erhalten.

Die Charakterisierung und Klassifizierung von Prozessen in Gebieten aktiven Ventings sollen die Möglichkeit der Erkennung von Venting auch in fossilem Material ermöglichen. Damit ist eine neue Möglichkeit gegeben, abgeschlossene Prozesse an fossilen Plattenrändern zu charakterisieren und ihre Auswirkungen zu erkennen und zu quantifizieren, um so die Vergangenheit als Schlüssel für die Zukunft zu nutzen.

2 Vent-Biologie

Vent-Gebiete, hoch- oder niedertemperierte, zeichnen sich durch ein extremes geochemisches Milieu aus, das für die meisten Organismen toxisch ist. Wenige Mollusken, Bartwürmer und Serpuliden haben sich angepaßt. Ähnliche Lebensgemeinschaften sind bereits aus dem Karbon (VON BITTER ET AL. 1992) und aus der Kreide bekannt (BEAUCHAMP ET AL. 1989). Die Zusammensetzung der Lebensgemeinschaften hat sich offenbar seit dem Paläozoikum kaum verändert, da diese isolierten Lebensräume von Massensterben in der Erdgeschichte nicht betroffen waren (TUNNICLIFFE 1992). Die Organismen treten immer in "Nestern" auf, d.h. in engem Verbund, mit unterschiedlicher Flächenausdehnung.

2.1. Wachstum und Verbreitung der Organismen

Im Arbeitsgebiet vor Oregon bildet der Kontinentalhang kleinere Absätze. Auf diesen siedeln die Organismen. Die Ausdehnung der Felder ist durch die Größe des Absatzes begrenzt. In Bereichen mit extremen Massen an Carbonaten finden sich ebenfalls nur begrenzte ebene Flächen, auf denen die Organismen leben können. Häufig folgt die Anordnung der Organismen einer Biozönose Lineationen (Tafel 1), diese markieren vermutlich den Austritt von Störungsflächen, an denen Fluide entweichen. Ähnliche Anordnungen der Biozönosen sind aus der Japan-Subduktionszone bekannt (JUNIPER & SIBUET 1987, SIBUET ET AL. 1988).

Der Kontinentalhang vor Peru ist durch große Rutschungen gekennzeichnet. Die Organismen siedeln sich bevorzugt an den Abrißflächen an, die jedoch meist sehr steil sind. Im Bereich der Rutschungen sind häufig kleinere Biozönosen zu beobachten. In den Rutschmassen selbst sind tote Organismen bzw. leere Schalen enthalten, die vermutlich in einem höher gelegenen Teil des Hanges mitgeschleppt wurden.

Insgesamt spielt die Morphologie des Untergrundes, die an aktiven Kontinentalrändern durch rezente Tektonik einem ständigen Wechsel unterliegt, eine entscheidende Rolle für die Größe, Zusammensetzung und Entwicklung einzelner Biozönosen.

Haupt-Organismen dieser Biozönosen sind folgende:

***Calypptogena* sp. (vesicomysid clam)**

Riesenmuscheln der Gattung *Calypptogena* sind die häufigsten Organismen in Vent-Gebieten, unabhängig von der Temperatur. Sie stecken im Sediment, senkrecht zur

Wachstumsrichtung. In ihren Kiemen beherbergt *Calyptogena* Bakterien, die eine chemoautotrophe Ernährungsweise ermöglichen (BOULÈGUE ET AL. 1987, CAVANAUGH 1983, FELBECK ET AL. 1981). Auch die Bakterien selber sind vermutlich eine Nahrungsquelle für *Calyptogena* (FIALA-MEDIONI ET AL. 1994). Durch Oxidation von CH_4 - und H_2S - werden reduzierte Komponenten den Organismen zugänglich. Biomassen (Feuchtgewicht der Makrofauna) von 16-51 kg/m^2 im Tenryu Canyon und am Zensiu Ridge (OTHA & LAUBIER 1987) und 20 kg/m^2 im Nankai Trough (SIBUET 1990) wurden an lokalen Austrittsstellen der Vent-Fluide beobachtet. In der umgebenden Tiefseeebene sind demgegenüber in Abhängigkeit von der Wassertiefe Biomassen (Feuchtgewicht der Makrofauna) von <20 bis >5 g/m^2 (LALLI & PARSONS 1993) zu erwarten. Das in den austretenden Vent-Fluiden enthaltene Methan wird oxidiert und bildet die Haupt-Quelle für die Bildung der Schalen. Da viele Vents unterhalb der CCD (Carbonate Compensation Depth) liegen, sind die Schalen z.T. bereits stark angelöst. Dennoch erreichen die Organismen Größen bis ca. 10cm Länge und 25cm Breite. Verschiedene Gattungen dieser Art wurden beschrieben (Rev. BOSS & TURNER 1980, FIALA-MEDIONI & LE PENNEC 1988, 1989, OKUTANI & EGAWA 1989), eine umfassende Systematik fehlt jedoch noch. Die vor Oregon beprobten Organismen sind vermutlich der Gattung *C. magnifica* zuzuordnen, die vor Peru beprobten gehören einer kleineren Gattung, wahrscheinlich *C. phaseoliformis*, an.

Charakteristisch für *Calyptogena* ist eine Reduktion des Filtrationsapparates und eine Vergrößerung der Kiemen (FIALA MEDIONI & LE PENNEC 1988, 1989, BOULÈGUE ET AL. 1989), die dicht von Symbionten besiedelt sind. Die Ausprägung dieser Merkmale bestätigt die Abhängigkeit der Organismen von einer chemoautotrophen Ernährungsweise. Ausgangsprodukte können sowohl Methan, als auch Schwefelwasserstoff sein (CHILDRESS ET AL. 1986). Die Verwendung beider Komponenten innerhalb einer Biozönose bzw. eines Organismus konnte an Invertebraten nachgewiesen werden (ENDOW & OTHA 1989, SCHMALJOHANN ET AL. 1990, FISHER ET AL. 1993, GAL'CHENCO ET AL. 1988).

Das Wachstum von *Calyptogena* hängt von lokalen Gegebenheiten ab. Physikalisch/chemische Bedingungen bestimmen die Wachstumsrate und das Überleben (BERG 1985, LUTZ ET AL. 1985, ROUX ET AL. 1985, RHOADS ET AL. 1981). Erste Zeichen von Geschlechtsreife bei Calyptogenen an Hot Vents wurden nach 1-4 Jahren festgestellt, ausgewachsene Organismen sind 3-15 Jahre alt. Sie sind reproduktionsfähig bis mindestens 16cm Länge (9-12 Jahre) (BERG 1985). Allgemein kann ein Einsetzen der Geschlechtsreife bei ca. 40% der maximalen Größe angenommen werden (BERG 1985).

Die Schalen von *Calyptogena* werden bis ca. 5 mm dick. Im Bereich nahe dem Schloß können die Schalen jedoch durch Anlösung so weit ausgedünnt sein, daß sie durchscheinend werden. Von Kohlenwasserstoff-Vents sind *in vivo* Zerstörungen der Muschelschalen durch Mikro-Bohrorganismen bekannt (HOOK & GOLUBIC, 1993). Diese treten bei *Calyptogena* offenbar nicht auf. Detailaufnahmen deuten lediglich auf chemische Anlösung der Schale im jüngeren Teil hin.

Mineralogisch konnte kein Unterschied zwischen den verschiedenen Schalenschichten festgestellt werden. Alle Teile der Schale bestehen aus Aragonit, wie XRD-Aufnahmen gezeigt haben.

Feinstrukturanalysen wurden an *Calyptogena*-Schalen aus allen Arbeitsgebieten durchgeführt. Durch Anwendung eines speziellen Ätzverfahrens (MUTVEI 1979, DUNCA & MUTVEI 1994) werden einzelne Wachstums-lamellen sichtbar (Tafel 2). Die Schalen bestehen aus zwei Schichten und sind in ihrer kompakten Struktur mit *Arctica islandica* (MUTVEI, pers. Mitteilung) vergleichbar. Die Wachstumslinien reflektieren ein kontinuierliches Wachstum. Deutlich hervortretende Linien folgen keiner Periodizität, wie saisonal beeinflusste Schalen (MUTVEI ET AL. 1994), sondern treten in unregelmäßigen Abständen auf.

Eine direkte Nutzung des austretenden Porenwassers erfolgt durch *Calyptogena* (JUNIPER & SIBUET 1987). Daher sind geochemische Charakteristika des Porenwassers auch in den sukzessive aufgebauten Schalen, sowie im Weichkörper von *Calyptogena* zu erwarten.

Solemya sp.

Solemya ernährt sich ebenso wie *Calyptogena*, chemoautotroph (CHILDRESS ET AL. 1986, FELBECK 1981, 1983, CAVANAUGH 1983). Die Organismen leben in kleinen Sedimentaufwölbungen ganz in das Sediment eingegraben. Da sie Wasser durch einen Gang pumpen, sind jeweils zwei Öffnungen außerhalb der Aufwölbungen zu erkennen (Tafel 1). Auf der Sedimentoberfläche finden sich nur leere Schalen von *Solemya*. Entsprechend sind ihre Verbreitung und ihr prozentualer Anteil in Vent-Biozönosen nur abschätzbar.

Ebenso wie bei *Calyptogena* ist bei großen *Solemya*-Exemplaren eine mehrschichtige Schale zu beobachten. Sie besteht aus Aragonit. Lösungsprozesse wurden hier nur in sehr geringem Maße, an disartikulierten Schalen, wirksam. Vermutlich ist das Periostrakum von *Solemya* resistenter gegen Säure als das von *Calyptogena*. Lösungsprozesse an lebendigen Organismen sind nicht bekannt. Die Trennung von Außen- und Innenschale zur chemischen Analytik war nicht möglich.

Lamellibrachia barhami

Lamellibrachiidae sind eine Gattung der Vestimentifera, erstmals beschrieben von WEBB (1969), eine hochspezialisierte Gruppe, die neben den Annelida einem eigenen Stamm zugeordnet wird (JONES 1988). Sie zeichnen sich, ebenso wie die Mollusken, durch ihre chemoautotrophe Ernährungsweise aus (FELBECK 1981, CHILDRESS 1986, Review: JONES 1988). Die dafür verantwortlichen Bakterien befinden sich im mittleren Teil des nur im juvenilen Stadium vorhandenen Darmes. Es wird angenommen, daß sie durch den einstmals durchgängigen Verdauungstrakt in den Körper gelangen (JONES & GARDINER 1988). Bei späterer Rückbildung des Verdauungstraktes werden sie im Körper isoliert. Anatomische und ökologische Besonderheiten der Organismen erschweren eine Klassifizierung.

Die systematische Einordnung nach morphologischen Merkmalen (JONES 1985, E. SOUTHWARD 1991) und dem Vergleich ontogenetischer Frühstadien (JONES & GARDINER 1989) ergibt eine parallele Gruppe der Vestimentifera zu den Pogonophora, in der die *Lamellibrachiidae* eine eigene Untergruppe bilden. Neuere molekulargenetische Untersuchungen (WILLIAMS ET AL. 1993) ergaben, daß kein wesentlicher Unterschied zwischen Organismen an hydrothermalen und kalten Vent-Sites besteht. Die als typisch für Cold Seeps angesehene Gruppe *L. barhami* wurde inzwischen auch an Hot Vents gefunden (E. SOUTHWARD 1991), ihre Lebensweise scheint daher nicht temperaturabhängig zu sein.

Endosymbionten regeln den Stoffwechsel der Organismen. In Hot Vent-Gebieten wurden Bakterien als Symbionten beschrieben, die reduzierte Schwefelkomponenten (H_2S) für ihren Stoffwechsel nutzbar machen (FELBECK 1981, CAVANAUGH 1983, FELBECK 1983). Diese Art des Stoffwechsels ist auch bei der verwandten Gruppe der Pogonophora bekannt (FLÜGEL & LANGHOF 1983, FLÜGEL 1990) die in Gebieten mit methanreichen Sedimenten wie Skagerrak und Nord-Atlantik vorkommen. Es ist anzunehmen, daß an methanreichen Cold Seeps ein paralleler Mechanismus wirksam ist. Kolonien von *L. barhami* wurden nur vor Oregon gefunden. Bisher ist diese Gattung der Vestimentifera nur aus dem östlichen Pazifik bekannt (JONES, 1985, KULM ET AL. 1986, SUESS ET AL. 1985). Typische Kolonien von *Lamellibrachia barhami* haben einen Durchmesser von 50-80 cm und bestehen aus einem Knäuel von 20-30 Individuen (Tafel 3). Die Knäule bilden gedrungene Formen. Zu großes Höhenwachstum würde wahrscheinlich die Nahrungsquellen, durch Verdünnung mit Seewasser, zu weit reduzieren. Nach KULM ET AL. (1986) wurzeln sie entweder in Vertiefungen oder in weichem Sediment, das von einer Carbonatkruste überlagert wird. Es sind aber darüber hinaus auch locker auf dem Sediment liegende Knäule beobachtet worden. Sie treten nur in der Nähe authigener

Carbonate auf. Die Röhren erreichen Längen von über einem Meter, die Weichteile sind meist zwischen 50 und 60 cm lang.

Das Wachstum von *L. barhami* erfolgt nicht, wie zunächst angenommen, in Segmenten (KULM ET AL. 1986, SUESS ET AL. 1985), sondern ist vielmehr ein kontinuierlicher Vorgang. Die chitinen Röhren sind aufgebaut aus einzelnen hauchfeinen Häutchen. Diese werden innerhalb der Röhre angelagert. Die Häutchen sind zur Mündungsöffnung hin verdickt (Abb. 8), dadurch entsteht ein Trichter. Dieser wird sukzessive ausgekleidet, bis er den gleichen Durchmesser hat, wie der übrige Teil der Röhre. Zuletzt wird eine innere, sehr glatte Schicht angelagert, die sich leicht von der äußeren trennen läßt. An den äußersten rezenten Enden konnte diese Schicht noch nicht beobachtet werden, vielmehr findet in den oberen Zentimetern ein gleitender Übergang statt. Unterhalb ca. 6 cm ist der innere Teil dunkelbraun gefärbt. Im oberen Teil ist er gelblich, ebenso wie die äußeren Schichten.

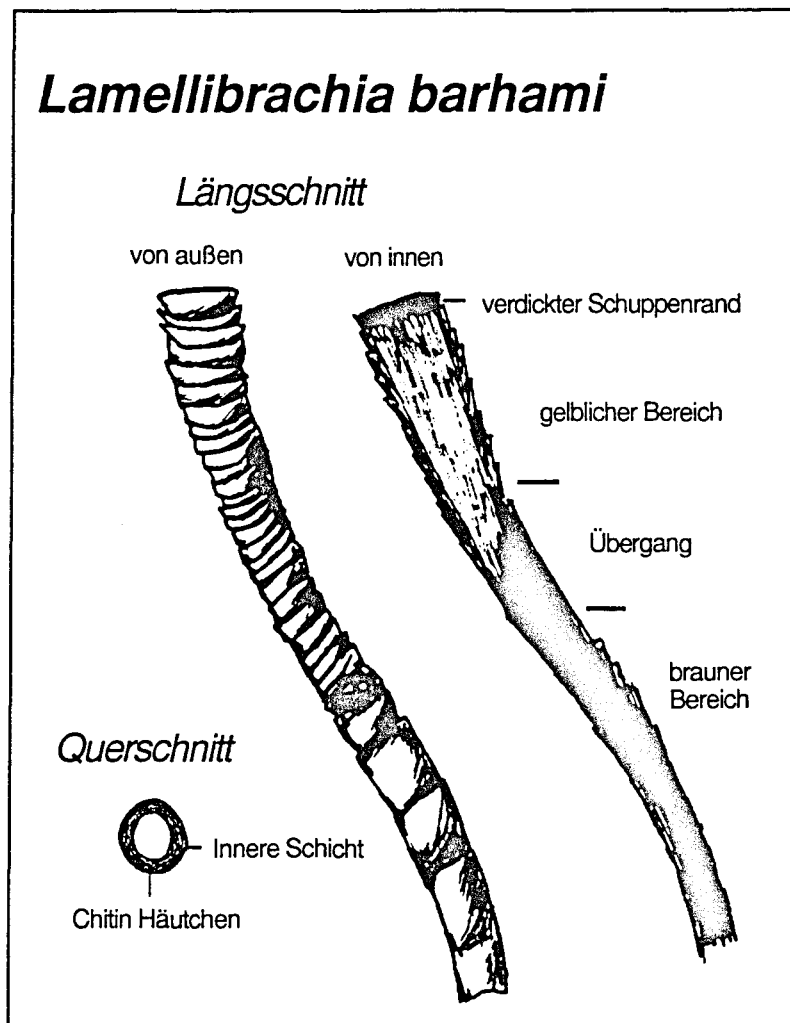


Abb. 8 Struktur der Röhren von *Lamellibrachia barhami*

Die jeweils außen angelagerten, verdickten Schichten werden an ihrem äußeren Ende abgetragen, so daß die Röhre das Aussehen eines Palmenstammes erhält, an dem die unteren Blätter bereits abgefallen sind. Diese Abtragung und evtl. Anlösung der äußeren Schichten hält beständig an. Ältere Individuen haben deshalb an ihrem juvenilen Ende eine vollständig glatte Röhre.

Von den Röhren von *L. barhami* liegen bisher keine detaillierten Untersuchungen vor. GAILL & HUNT (1986) analysierten die Röhren einer anderen Gattung der Vestimentifera (*Riftia pachyptila*). Sie bestehen aus einem Chitin Proteoglycan/Proteinkomplex und weisen extrem geringe Gehalte anorganischen Materials auf. Auch VAN DER LAND & NØRREVANG (1977) hatten festgestellt, daß die Röhren chitinartig und stark proteinhaltig sind.

Durch die Anlagerung hauchfeiner Blättchen sind die Würmer nicht auf ein schnurgerades Wachstum festgelegt. Sie können unregelmäßige Formen, ähnlich verbogenen Drähten, annehmen, aber auch verschlungene Formen bilden - wahrscheinlich in Abhängigkeit von äußeren Widerständen. Wachstumsraten von mindestens 9,5-12,7 cm/y konnten an Vestimentifera festgestellt werden, die sich in einem Schiffswrack angesiedelt hatten, in dem große Lebensmittelvorräte verfaulten (DANDO ET AL. 1992).

Die Vestimentifera sind bisher nur aus dem östlichen Pazifik bekannt. Ihre Ausbreitung ist bisher ungeklärt, es wird jedoch angenommen, daß ihre Larven keine weiteren Strecken zurücklegen können, auf denen keine Nahrungsquellen zur Verfügung stehen. Als "Stationen" auf Wanderungen werden tote Walkörper angenommen, die durch Verwesung ein geeignetes Biotop für die Vestimentifera bilden. Ein Walskelett wurde 1993 während einer *Alvin*-Tauchkampagne im Bereich der Vent-Gebiete vor Oregon gefunden.

Serpulidae

Die zu den Anneliden gehörenden Serpuliden bilden vor Peru das Pendant zu den Vestimentifera vor Oregon. Obwohl weltweit verbreitet, sind sie in den Untersuchungsgebieten nur vor Peru gefunden worden. Die Serpuliden repräsentieren eine ebenso archaische wie primitive Lebensform. An der Körperoberfläche scheiden sie Calcit ab, das ihre Röhren bildet. Die Körper sind wenige Zentimeter lang. Die Röhren können wahrscheinlich mehrere Dezimeter lang werden. Auf Foto- und Videoaufnahmen sind sie als dichte Knäule zu erkennen (Tafel 3). Da die Röhren sehr brüchig sind, ist es bisher nicht gelungen, ganze Röhren zu beproben; Bruchstücke waren jeweils nur wenige Zentimeter lang.

Vent-Biologie

Serpuliden siedeln vor Peru unmittelbar an den Austrittsöffnungen der Vent-Fluide. Da sie sich an jedes Substrat anheften können, besiedeln sie die steilen Hänge der Abrißkanten, die für *Calyptogena* und *Solemya* nicht bewohnbar sind. In Gebieten von mehreren Quadratmetern Ausdehnung bilden die Serpuliden dichte "Wälder". Ihre Ernährungsweise ist ungeklärt. Es wird angenommen, daß Serpuliden von partikulärem organischem Material leben, das von *Calyptogena*-Kolonien produziert wird (JUNIPER & SIBUET 1987). Eine chemoautotrophe Ernährungsweise ist nicht bekannt. Es ist unklar, welche chemischen Komponenten sie in Vent-Gebieten für ihren Stoffwechsel nutzbar machen. Möglicherweise ernähren sie sich von in der Wassersäule freilebenden Bakterien. Vor Peru sind jedoch große Serpuliden-Kolonien beobachtet worden, denen z.T. nur sehr kleine *Calyptogena*-Populationen gegenüberstehen. Die mengenmässige Verteilung der Organismen ist hier von der Topographie unabhängig. Entsprechend ist anzunehmen, daß auch die Serpuliden eine Möglichkeit zur primären Nutzung der austretenden Fluide haben.

Die Serpulidenröhren bestehen aus einer einzigen dünnen Calcitschicht. Das Wachstum erfolgt in Ringen, die sich morphologisch abheben.

Weitere Organismen

Neben den wenigen auf chemoautotrophe, endosymbiontische Lebensweise spezialisierten Vertretern der Vestimentifera, Anneliden und Mollusken sind nur sehr wenige weitere Makroorganismen aus Subduktions-Vents bekannt. Im Chiclayo-Canyon konnten einige Gastropoden und Napfschnecken (Limpets) geborgen werden. Napfschnecken treten auch in den "alten" Vent-Gebieten vor Oregon (1428 und Umgebung) auf. Sie sitzen auf den Schalen großer Calyptogenen. Auf kleineren sind sie nicht beobachtet worden. Eine Beschreibung von Limpets an hydrothermalen Vents findet sich bei MCLEAN (1985). Vermutlich sind an Cold Seeps die gleichen Arten anzutreffen.

Vor Oregon gehören auch große Krebse in die Nähe der Vent-Biozönosen. Sie scheinen sich von den Mollusken zu ernähren und sind auch für die Verteilung leerer Schalen am Tiefseeboden, außerhalb der Organismengemeinschaften, verantwortlich. Vor Peru lebt *Munidopsis* (Dekapoda) im Bereich der chemoautotrophen Organismen. Diese Organismen sind nicht beprobt worden.

TAFEL 1

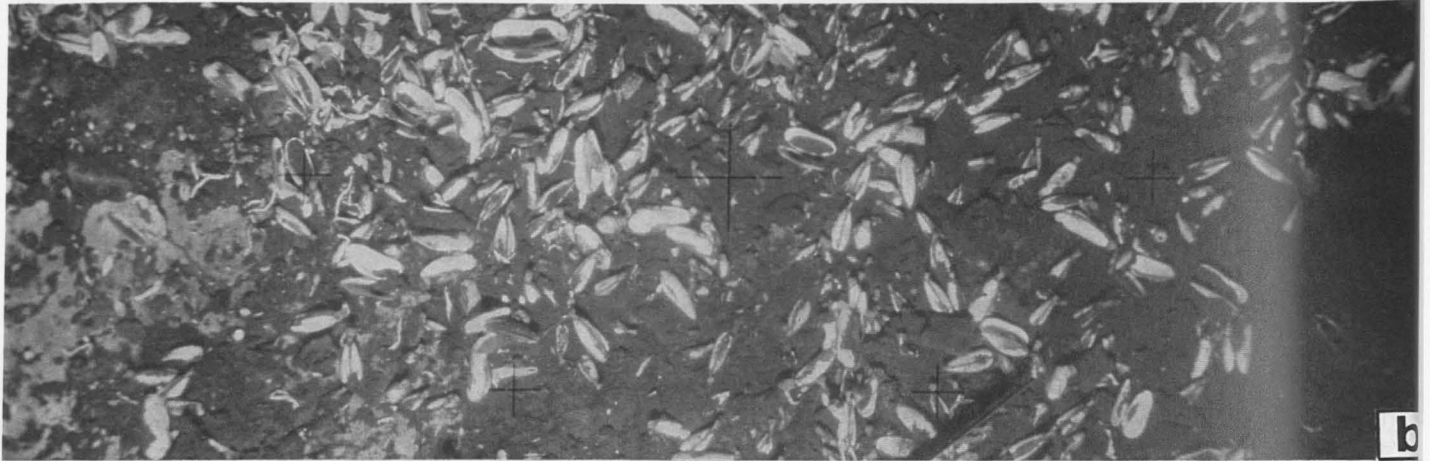
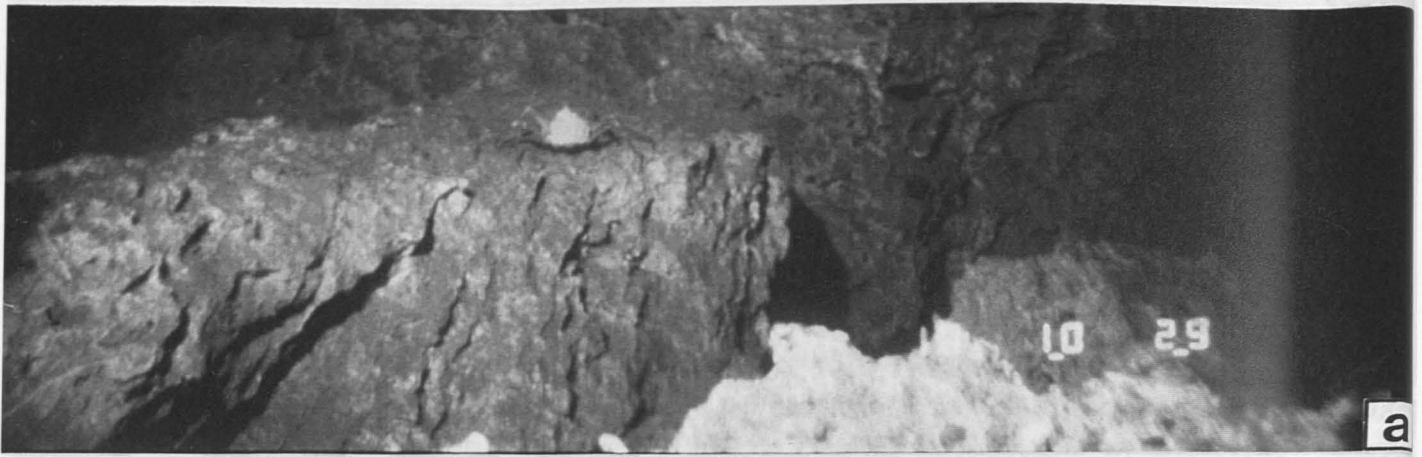
a) Carbonatstrukturen im Arbeitsgebiet Bioherm; b) typisches Erscheinungsbild einer Biozönose im Arbeitsgebiet Paita; c) Anordnung einer *Calypptogena* Kolonie entlang einer wahrscheinlich tektonischen Lineation; d) Nahaufnahme im Bereich einer Biozönose am Marginal Ridge, in der Ein- und Ausstromloch eines *Solemya*-Hügels zu erkennen sind.

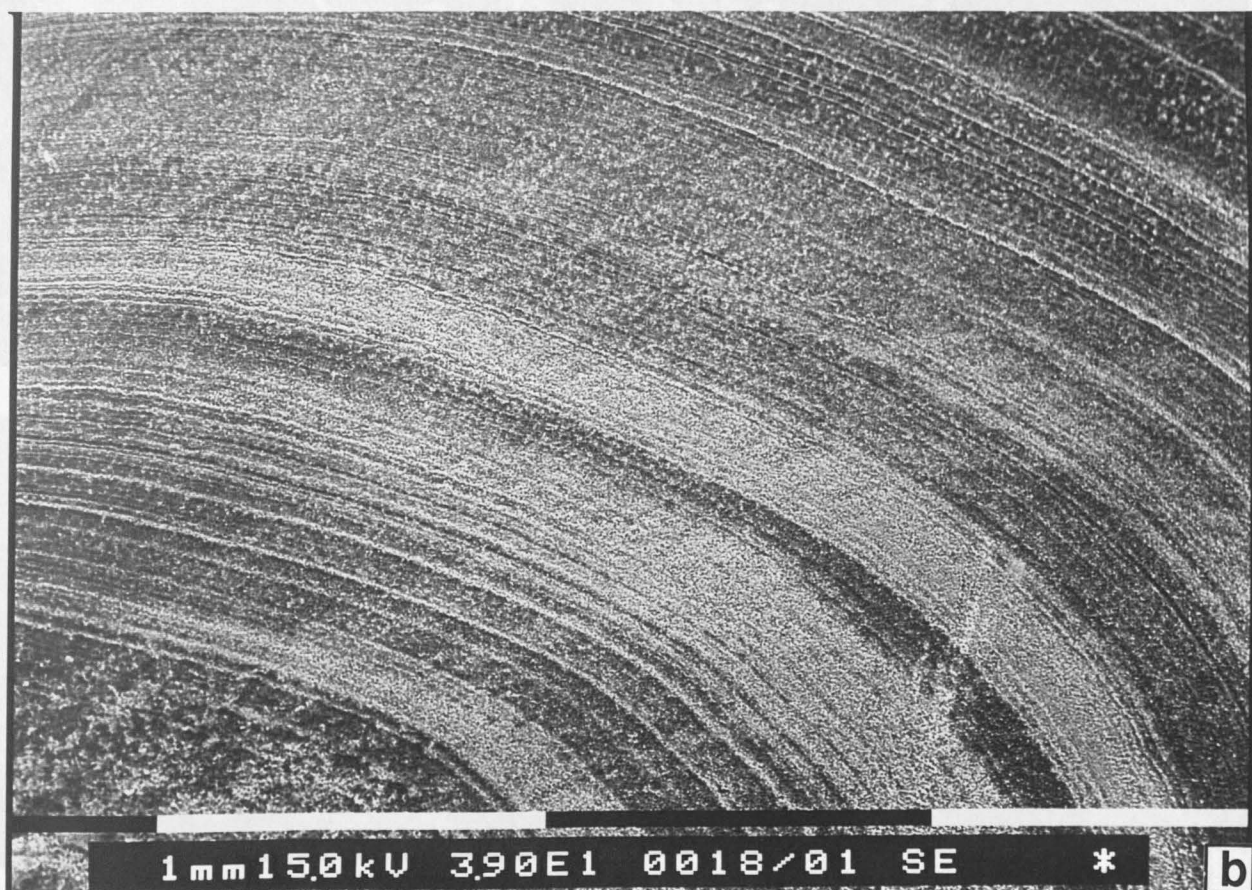
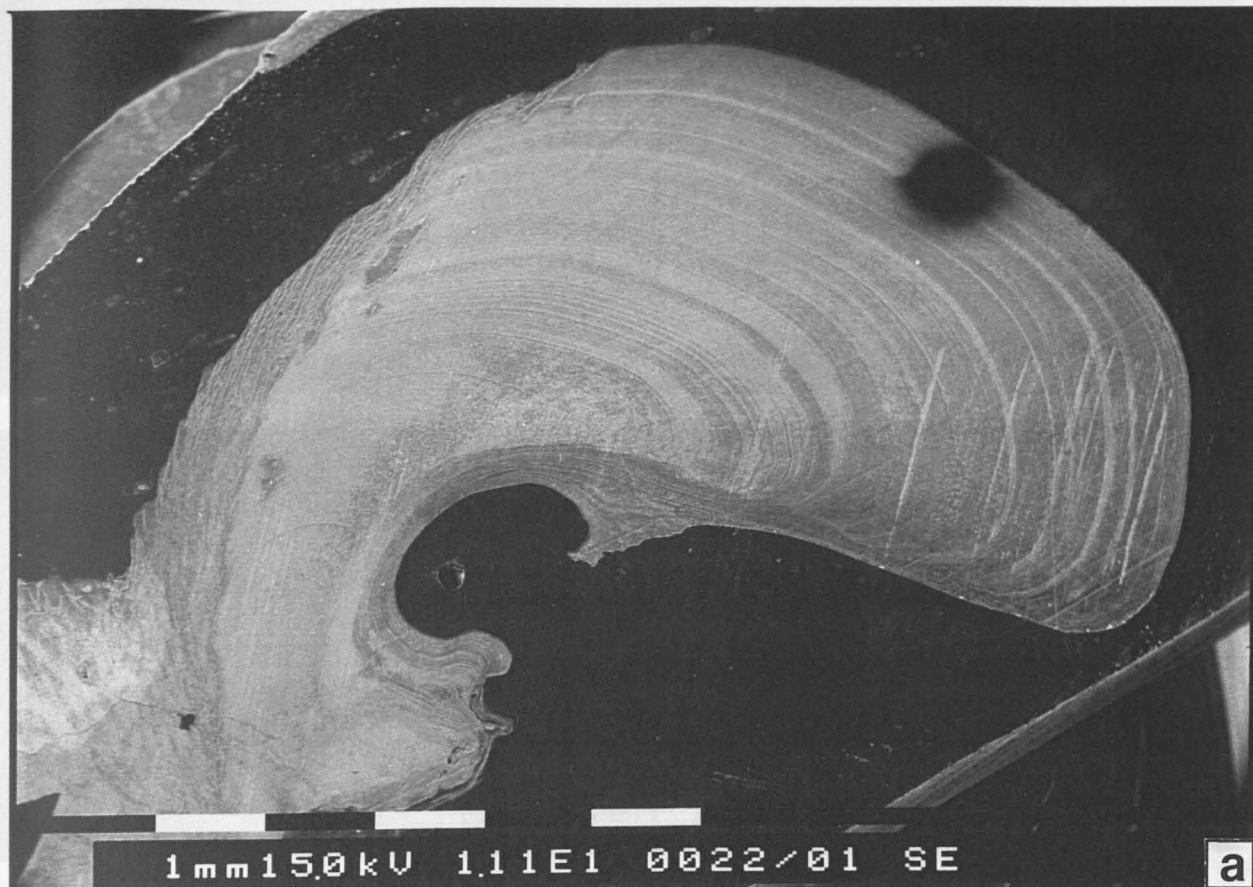
TAFEL 2

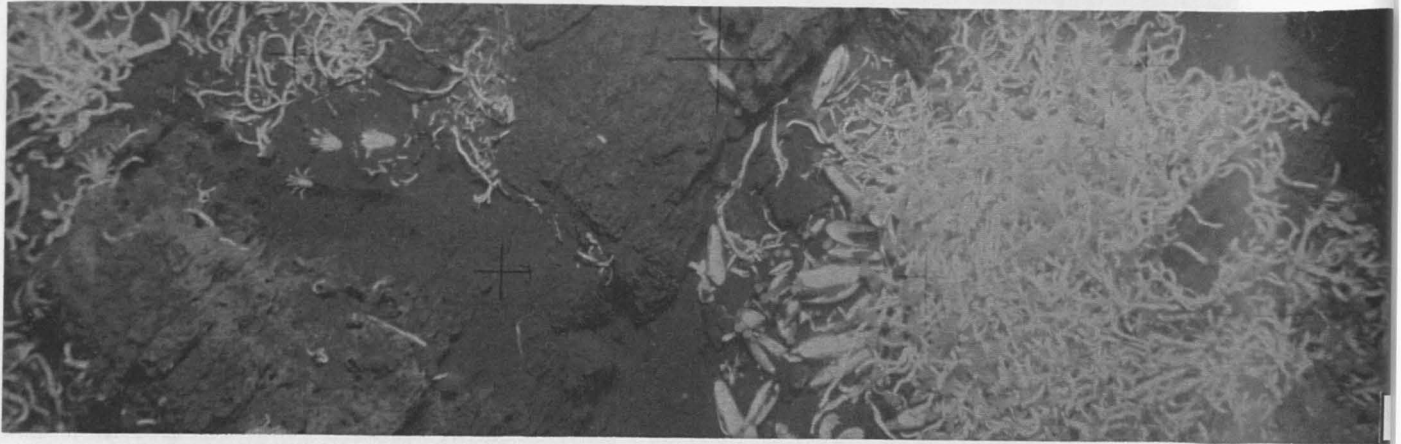
Feinstrukturaufnahmen (REM) einer *Calypptogena* Schale (Marginal Ridge, Site 2656) nach Anätzung. In der Nabelregion finden sich alle Strukturen der Schale wieder. a) Übersicht; b) Detailaufnahme.

TAFEL 3

a) *L. barhami* Kolonie am Marginal Ridge; b) üppig wuchernde Serpuliden vor Paita; c) Felder mit lebenden Muscheln im Gebiet Bioherm 1990; d) Baryt-Krusten vor Paita breiten sich aus wie ein Schaumteppich.







2.2 Beschreibung der beprobten Vent-Sites

Die bearbeiteten Vent-Gebiete haben keine Eigennamen oder folgen einer Nomenklatur. Diejenigen vor Oregon wurden nach *Alvin*-Tauchgängen benannt, diejenigen vor Peru in regionale Einheiten zusammengefaßt, die nach der nächstliegenden Stadt auf dem südamerikanischen Kontinent benannt wurden.

2.2.1 Cascadia Subduktionszone

Auf dem Marginal Ridge vor Oregon liegende Vent-Gebiete sind jeweils mit Nummern gekennzeichnet, die *Alvin*-Tauchgängen entsprechen. Der Einfachheit halber wird im folgenden nur die Nummer des Tauchganges verwendet, bei dem das Gebiet entdeckt wurde (1428, 1900, 2658). Der Second Ridge ist durch die Lokalität "Bioherm" repräsentiert.

1428 (2656)

Im Gebiet 1428 sind neben *Calypotgena* und *Solemya* auch Kolonien des zu den Vestimentifera gehörigen Bartwurms *L. barhami* gefunden worden. Sie bilden kleine Knäule und befinden sich im Randbereich der Vent-Kolonien. Hier finden sich auch große Carbonatblöcke, die sich hangaufwärts wie zwei Wände eines Kanals fortsetzen. Zwischen den Blöcken treten immer wieder Kolonien von *L. barhami* auf. Sie sind häufig von Hydrozoen überwuchert und sehen aus wie verstaubt.

Die eigentliche Vent Biozönose zeigt Spuren des Alters. Auf den ersten Blick scheint es sich um eine Ansammlung leerer Schalen zu handeln. Sie prägen das Gesamtbild. Dazwischen finden sich immer wieder Ansammlungen junger Calypotgenen in Lebendstellung. Sie scheinen jeweils etwa gleich alt zu sein. Größere und damit ältere Exemplare sind dazwischen verstreut. Sie liegen auf dem Sediment und stecken nicht senkrecht darin. Feine Sedimentpartikel bedecken Teile der großen Schalen. Diejenigen Teile, die nicht bedeckt sind, sind dem korrosiven Meerwasser ausgesetzt und werden angelöst. Freie gewölbte Gebiete zwischen den Calypotgenen werden offenbar von *Solemya* bewohnt. Disartikulierte Schalen dieser Art liegen über das gesamte Areal verstreut.

Auf allen großen *Calypotgena*-Schalen in diesem Gebiet wurden kleine Napfschnecken gefunden. Sie sitzen unregelmäßig verstreut auf den Schalen und hinterlassen darauf keine Spuren.

Im Unterschied zu den Untersuchungsgebieten vor Peru gehören vor Oregon offenbar große Krebse indirekt zur Vent-Biozönose. Sie laufen zwischen den *Calypptogena*-Nestern herum. Die Krebse treten zwar in den Vent-Gebieten auf, sind aber nicht an sie gebunden. Sie sind ebenso häufig an jeder anderen Stelle zu beobachten, an der sich potentielle Nahrung befindet.

Das Gebiet 1428 wurde 1984 entdeckt und 1993 ein zweites Mal besucht. Über diesen Zeitraum haben sich keine wesentlichen Veränderungen hinsichtlich der Organismendichte und -verteilung ergeben. Schon 1984 hatte sich demnach hier ein ökologisches Gleichgewicht eingestellt. Entsprechend ist von einer relativen Konstanz der hydrologischen Verhältnisse auszugehen.

2658/1+2

Zwei neue Biozönosen, 2658-1 und 2658-2, wurden 1993 in unmittelbarer Umgebung hangabwärts von 1428 entdeckt. Im Gebiet 2658-1 sind größere Ansammlungen lebender Calypptogenen zu beobachten. Der relative Anteil lebender Organismen ist weit größer als bei 1428. Das Gebiet 2658-2 wird von sehr großen Calypptogenen beherrscht, die entlang einer Linie, die vermutlich tektonisch vorgezeichnet ist, aufgereiht sind (Tafel 1). Es sind kaum disartikulierte Schalen zu beobachten. Am Ende der Linie befinden sich jüngere Organismen. Ein vollständiger Generationswechsel scheint hier noch nicht stattgefunden zu haben.

1900 (2046, 2663)

Site 1900 repräsentiert eine Biozönose im Gleichgewicht. Das heißt, es liegen sowohl große Mengen der Reste toter Organismen als auch lebendige Organismen vor. Neben Calypptogenen, die kleine Nester bilden, kommt hier auch *L. barhami* vor. Die Bartwürmer sind stark überwuchert. Sie leben auch hier außerhalb des Muschelfeldes. In der Umgebung des Muschelfeldes stehen entlang eines Tals Carbonate an. Sie sind plattig und durchlöchert und z.T. stark bewachsen oder sedimentbedeckt. Aus der Entfernung ist zu beobachten, daß die *Calypptogena*-Ansammlungen zwei gebogenen Linien folgen. An einigen Stellen sind aschgraue Flecken zu beobachten. Möglicherweise Bakterienmatten.

"Bioherm" (2283, 2653)

Die Lokation "Bioherm" repräsentiert heute eher ein fossiles als ein rezent Bioherm. Die extremen Gehalte von Molluskenschalen in Carbonatblöcken, die z.T. eine innere Struktur wie Schichtung oder Bänderung aufweisen, zeugen von Zeiten reichen Lebens in diesem Gebiet. Heute sind nur sehr wenige kleine Gruppen von Vent-Organismen zu beobachten. Kleine Nester von *Calypptogena* sind vereinzelt in sedimentbedeckten

Mulden, zwischen den Blöcken, zu finden. Die Organismen sind jeweils sehr klein und alle etwa gleich alt.

Das Gebiet wurde 1990 entdeckt und 1993 wieder besucht. 1990 fanden sich hier noch große und zusammenhängende Muschelfelder (Tafel 3), 1993 konnten dagegen große Felder mit leeren und zerbrochenen Schalen beobachtet werden. Hier zeigt sich deutlich die Veränderlichkeit von Vent-Gebieten innerhalb kurzer Zeit.

2.2.2 Peru

Die vor Peru untersuchten Gebiete entsprechen in ihrer Bezeichnung den in 1.2 eingeführten geographischen Bezeichnungen.

Chiclayo

Im Chiclayo-Canyon wurden während der NAUTIPERC-Expedition 1991 im unteren Teil, zwischen 3779 und 4046 m, Organismen beprobt. Die einzelnen Kolonien sind nicht besonders groß (max. 50 Individuen) und an tektonischen Lineationen orientiert. Die Biozönosen befinden sich auf Rutschmassen oder tektonischen Brekzien. Die Kolonien werden dominiert von *Calyptogena*, vermutlich *C. phaseoliformis* (B. MÉTIVIER, pers. Mitteilung).

Paita

Das Gebiet Paita zeichnet sich durch eine extrem steile Morphologie aus. Gruppen von Vent-Organismen befinden sich auf kleinen Absätzen. Es sind teilweise sehr kleine Gruppen von *Calyptogena* zu beobachten. Häufiger sind zerbrochene Schalen, die auf Rutschmassen hinweisen. Die Ebenen werden hauptsächlich von Holothurien bevölkert.

Im Gebiet Paita 2 wurden große zusammenhängende Vent-Gemeinschaften entdeckt. Dabei spielen Serpuliden eine ebenso große Rolle wie *Calyptogena*. Barytkrusten bedecken die Biozönosen wie ein Schaumteppich (Tafel 3) und konnten an allen Einsatzstellen, wenn auch in kleinsten Mengen, nachgewiesen werden (M. TORRES ET AL. 1994). Die meisten Biozönosen befinden sich direkt an den steilen Hängen. Serpuliden bewuchern direkt das anstehende Gestein. Gruppen von Calyptogenen sind auch auf kleinsten Absätzen und Plateaus zu beobachten. In den Ebenen ober- und unterhalb des Hanges finden sich praktisch keine Vent-Organismen. Hier bilden Seesterne die größte Organismengruppe.

Das Gebiet Paita wurde 1991 während der NAUTIPERC-Expedition entdeckt und beprobt. Während SO 78 sind hier Dredge-Fahrten durchgeführt worden, bei denen erneut Muschelschalen geborgen wurden.

Chimbote

Auch im Gebiet Chimbote beherrscht *Calyptogena* die Vent-Gemeinschaft. Große und zusammenhängende Muschelfelder sind beobachtet worden (SO 78, 1992). Vereinzelt kommen Serpuliden vor. Kleine Pogonophoren (*Siboglina?*) sind an einer Stelle gefunden worden.

Probenahmen erfolgten hier nur 1992 durch Dredge-Fahrten. Eine detaillierte Beschreibung der Vent-Sites ist daher nicht möglich.

3 Diagnostische geochemische Parameter im Vent-Geschehen

Untersuchungen der Verteilung charakteristischer Spurenelemente wurden von Wissenschaftlern unterschiedlicher Fachrichtungen an einer Vielzahl von Organismen in verschiedenen Seegebieten und Klimazonen durchgeführt. Cd/Ca- und Ba/Ca-Verhältnisse in Foraminiferen gelten z.B. als Anzeiger für das Nährstoffangebot in ihrer Umgebung und damit für die Herkunft der Wassermassen (BOYLE 1988, LEA & BOYLE 1991), Schwermetallkonzentrationen in Muscheln geben Hinweise auf den Eintrag industrieller Abwässer (TER JUNG 1992), oder Sr/Ca-Messungen an Korallen dienen als Paläo-Thermometer (BECK ET AL. 1987). B-Konzentrationen in Molluskenschalen sind mit der Salinität des Umgebungswassers korrelierbar (FURST ET AL. 1976). Ziel der Untersuchungen war es zumeist, Veränderungen in der ozeanischen Zirkulation und zyklische Schwankungen in unterschiedlichen Zeitskalen aufzuzeichnen sowie anthropogene Einflüsse auf Ökosysteme zu evaluieren. Unterschiedliche Spurenelemente dienen für einzelne Prozesse als diagnostische Parameter.

Die Spurenelemente, die in Verbindung mit Nährstoffen von Organismen aufgenommen werden, kommen stets aus der euphotischen Zone des Ozeans, den oberen ca. 200 m, in denen Primärproduktion stattfindet. Ihre Variabilität ist damit zwangsläufig von klimatischen Bedingungen abhängig. Globale Schwankungen resultieren aus globalen Schwankungen exogener Kräfte. Eine einzigartige Ausnahme von diesen Bedingungen stellen chemosynthetisch lebende Organismengemeinschaften dar, die ihre Nahrung nur durch das Wirken endogener Kräfte erhalten. Sie sind von klimatischen Bedingungen unabhängig, ihre Nahrungsquellen liegen unterhalb ihres Lebensraumes. In den hier beschriebenen Vent-Gebieten bedingt konvergente Plattenbewegung das Auspressen fossilen Meerwassers aus den Sedimenten des Akkretionskeiles. Spurenelemente, die mit den Fluiden an die Oberfläche gelangen, sind gelöste Komponenten aus den Sedimenten und daher von aktuellen klimatischen Bedingungen unabhängig.

In biogenen und anorganischen Carbonaten werden Spurenelemente anstelle von Calcium (Ca^{2+}) in das Aragonit bzw. Calcit-Gerüst eingebaut. Es besteht also eine Atombindung, und eingebaute Spurenelemente unterliegen keinen Austauschprozessen. Im Gegensatz dazu sind die speziellen Bindungsformen von Spurenelementen des untersuchten organischen Materials (Röhren von *L. barhami* und Weichteile aller Organismen) weitgehend ungeklärt. Zu erwarten sind sowohl stabile komplexe Bindungen als auch Adsorption an den Oberflächen. Insofern ist ein gewisser Prozentsatz der Spurenelemente in organischem Material sicherlich austauschbar.

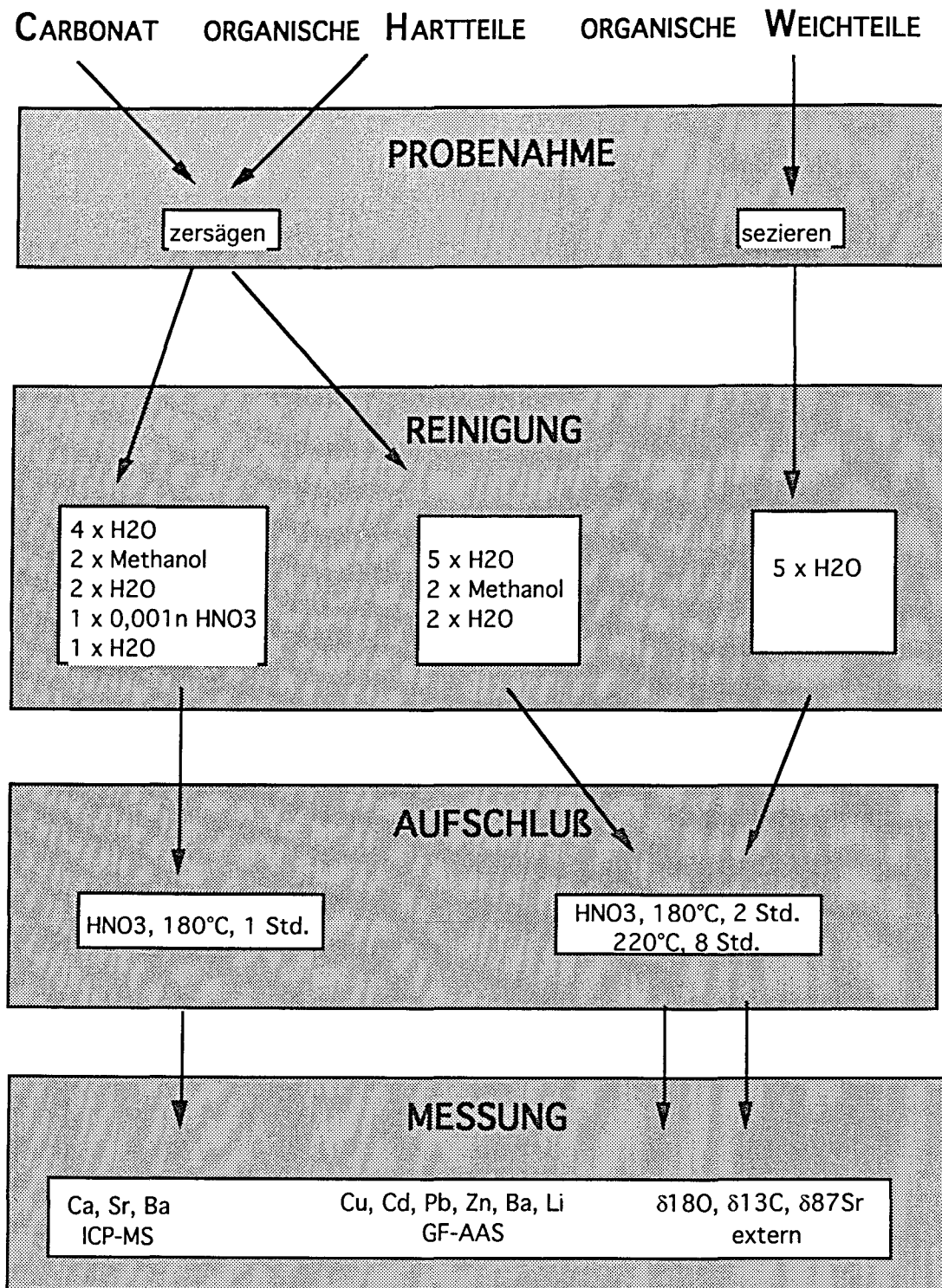


Abb. 9 Reinigungsschema für Spurenelementanalyse

Probenahme

Für die vorliegenden Untersuchungen wurden Hartteile von Organismen sequentiell beprobt, um eine zeitliche Auflösung über die Lebenszeit des Organismus zu erreichen. Weichteile repräsentieren jeweils eine Probe.

Von den Mollusken wurden, wenn möglich, Mantel, Fuß, Muskel, Siphon und Kiemen abgetrennt und gefriergetrocknet. Sehr kleine Organismen (Napfschnecken, Schnecken) wurden als Ganzes beprobt. Die Schalen wurden in Milli-Q-Wasser im Ultraschallbad mehrfach gereinigt und anschließend getrocknet.

Die Probenahme erfolgte bei *Calypptogena* und *Solemya* quer zu den Anwachsstreifen (Abb. 10). Dabei wurden mit einer Microsäge kleine Blöcke entlang eines Profils aus der Schale herausgesägt. Für die Isotopenanalysen wurden Proben oberflächlich abgefräst. In einigen Fällen war es möglich, Außen- und Innenschale getrennt zu beproben. Die Reinigung der Proben erfolgte mit Milli-Q-Wasser, Methanol und verdünnter Säure, jeweils unter Anwendung von Ultraschall (Abb. 9). Es wurden nur ultrareine Chemikalien verwendet. Die Probengefäße wurden stets geschlossen gehalten und nur unter sauberen Abzügen bzw. einer Clean-Bench geöffnet.

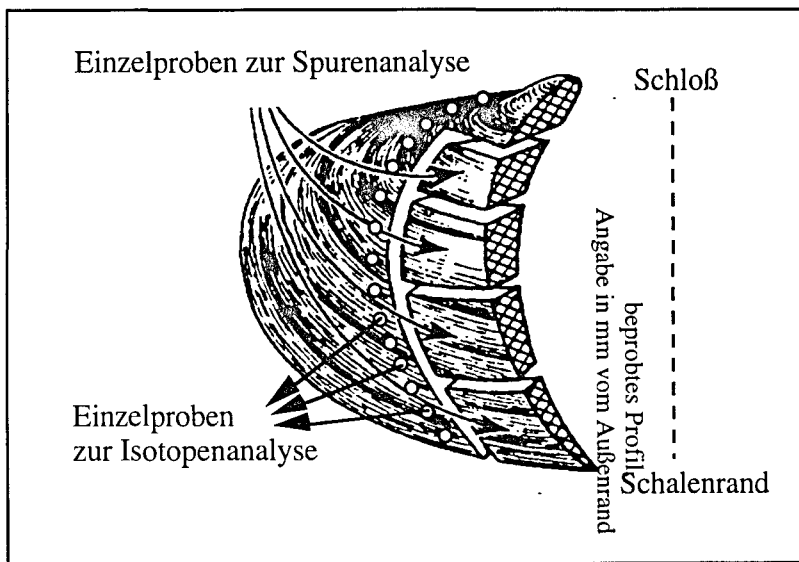


Abb. 10 Beprobungsschema für Molluskenschalen

Bei den Bartwürmern wurden ebenfalls, soweit vorhanden, die Weichteile von der Röhre getrennt und gefriergetrocknet. Die Röhren wurden gründlich mit Milli-Q-Wasser gewaschen und anschließend getrocknet. Die gesamten Röhren wurden in Ringe zersägt.

Die Weichteile aller Organismen wurden nach der Gefriertrocknung in Milli-Q-Wasser im Ultraschallbad gereinigt. Die Reinigung war sehr schwierig, da bei jedem Arbeitsschritt zwangsläufig kleine Gewebeteile mit dekantiert wurden und sich die Proben dadurch dezimierten. Es wurden so viele Spülschritte durchgeführt, bis das Wasser klar blieb.

Geochemische Analytik

Die Spurenanalytik der aufgeschlossenen Proben erfolgte mittels Graphitrohr-Atom-Absorptions-Spektrometrie (GFAAS) am GEOMAR für die Elemente Zn, Cu, Cd, Li, Pb und Ba. Die verwendeten Meßprogramme sind auf das Probenmaterial abgestimmt und aus den Standardprogrammen des Geräteherstellers modifiziert. Sie sind im Anhang aufgeführt. Da Ca eine sehr starke Matrix bildet, treten in den unteren Meßbereichen bei allen Elementen große Standardabweichungen auf. Im mittleren Meßbereich ist jedoch stets eine gute Reproduzierbarkeit gewährleistet. Abb. 11 zeigt eine Statistik der Standardabweichungen in bezug auf den jeweiligen Meßbereich. Alle Messungen sind Dreifachmessungen. Bei Standardabweichungen über 5% wurde die Messung automatisch wiederholt.

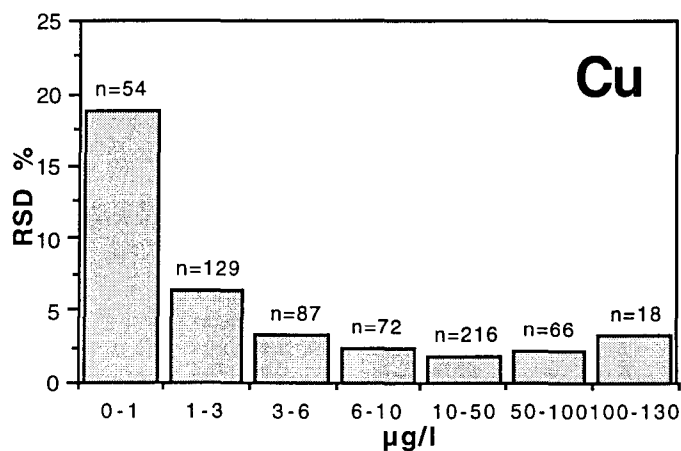


Abb. 11 Meßstatistik für Spurenanalysen

Ca und Sr, sowie teilweise Ba wurden am Geologischen Institut der Universität Kiel im Plasma durch Atom-Emissions-Spektrographie (ICP-AES) gemessen. Bei dieser Methode sind laut langjähriger Erfahrung Standardabweichungen von 3% als allgemeingültig anzunehmen. Es wurden daher nur Einfachmessungen durchgeführt und bei jeder Messreihe einige Proben zur Kontrolle mehrfach gemessen. Der Messbereich liegt bei dieser Methode im Bereich von mg/l. Daher konnte Ba aufgrund zu geringer Konzentrationen nicht immer erfaßt werden.

Proben eines ausgewählten Organismus aus einem Vent-Gebiet vor Oregon wurden zusätzlich massenspektrometrisch im Plasma (ICP-MS) am Geologischen Institut gemessen. Die Meßreihen wurden zur Überprüfung der AAS-Daten verwendet. Diese Multielement-Meßmethode verschafft außerdem einen Überblick über den gesamten Chemismus einer Probe.

Die Vergleichbarkeit verschiedener Meßmethoden untereinander wurde anhand des Elementes Barium getestet. Ein Probensatz wurde mit allen drei Methoden untersucht. Dabei ergab sich eine gute Übereinstimmung von ICP-AES und ICP-MS. Die AAS-Messungen wichen systematisch davon ab und zeigen zunehmend höhere Werte. Da sich Matrixeffekte in der Unterdrückung eines Signals äußern, können diese hier allenfalls bei den ICP-Meßmethoden wirksam sein.

Für die Elemente Cu, Zn und Li wurden einzelne Proben des mit ICP-MS gemessenen Datensatzes auch mit GFAAS gemessen. Es ergaben sich keine gravierenden Abweichungen.

Eine Standardisierung des Reinigungs- und Aufschlußverfahrens sowie eine Optimierung der Laborbedingungen (Verwendung ultrareiner Chemikalien, Reinigung der Gefäße, Herabsetzung der Verdunstung im Probenteller bei Messung, Qualitätskontrolle der Messungen) ermöglicht eine direkte Vergleichbarkeit aller untersuchten Proben.

Alle gemessenen Konzentrationen in Carbonaten wurden in $\mu\text{mol Element/mol Ca}$ -Angaben umgerechnet (mmol/mol für Sr), um eine vergleichbare Größe für die Substitution von Ca zu erhalten. Auf diese Weise wird die Anzahl der Atome eines Elements berücksichtigt, nicht aber deren Gewicht. Bei organischen Materialien erfolgt die Angabe in ppm, bezogen auf die Einwaage an gereinigter Trockensubstanz.

Die Mineralogie und Struktur von Carbonatproben wurde mittels Röntgendiffraktometrie (XRF) untersucht. Für die Beurteilung der Feinstruktur wurden Schalen von *Calypptogena* angeätzt (nach MUTVEI 1979) und unter dem Binokular oder Rasterelektronen-Mikroskop (REM) untersucht.

Die Analyse stabiler Isotope wurde zum Teil an der Oregon State University und zum Teil im ^{14}C -Labor der Universität Kiel durchgeführt.

3.1 Interpretation von Spurenelementdaten

Wie die direkten Beobachtungen an Vents gezeigt haben, sind Vent-Biozönosen grundsätzlich auf wenige m² beschränkt. Entsprechend können nur Organismen, die einer Gruppe entstammen, direkt miteinander verglichen werden. Schon für eine wenige Meter entfernte Gruppe können nicht a priori die gleichen Bedingungen angenommen werden.

Vergleichbarkeit unterschiedlicher Materialien

Aus den Vent-Gebieten vor Peru und Oregon sind verschiedene Organismen mit Hart- und Weichteilen untersucht worden. Die untersuchten Materialien lassen sich in zwei Gruppen einteilen:

- (1) Carbonate (CaCO₃) in calcitischer und aragonitischer Struktur: Schalen der Molluska, Serpulidenröhren, Konkretionen
- (2) Organisches Material; Weichteile der Molluska, Röhren und Weichteile der Vestimentifera, Weichteile der Serpuliden

Die Schalen der Mollusken sind zwar biogen gebildet, weisen jedoch eher anorganische als organische Züge auf. Das Paradoxon der Aragonitbildung, obwohl Calcit unter den gegebenen Druck- und Temperaturverhältnissen viel stabiler wäre (MORSE 1986), ist nur ein Indiz dafür. Die Bildung der Schale erfolgt nicht unmittelbar aus entsprechenden Epithelzellen, sondern aus einer Flüssigkeit (Extrapallialflüssigkeit), wobei sich organische Bestandteile eher passiv verhalten (TAYLOR ET AL. 1969). Die Extrapallialflüssigkeit befindet sich im Extrapallialraum zwischen Mantel und Schale. Es wird angenommen, daß einzelne Epithelkammern in Kontakt mit dem Seewasser stehen (TAYLOR ET AL. 1969+ REF.) und damit auch dessen chemisches Inventar widerspiegeln. Konzentrationsunterschiede in der Schale repräsentieren also Konzentrationsunterschiede im Extrapallialraum der Muschel zur Zeit der Schalenbildung.

Es ist bekannt, daß Carbonate in marinem Milieu sehr reaktiv sind. Austauschprozesse verschiedener Spurenelemente wurden beschrieben (MORSE 1986). Da die Schalenbildung bei Mollusken jedoch unter dem Schutz des Periostracums stattfindet, ist der Einbau von Spurenelementen aus Vent-Fluiden ein primärer Prozeß. Das Periostracum schützt auch später die Schale und dort, wo es nicht mehr vorhanden ist, wird die Schale bereits beim lebenden Organismus angelöst. Austauschprozesse an Carbonatoberflächen können daher bei der Betrachtung von Muschelschalen vernachlässigt werden.

Serpuliden weisen eine calcitische Struktur auf. Die Röhren sind nicht von einer organischen Schicht überzogen und können daher u.U. mit dem Meerwasser reagieren. Eine Überprägung primärer Signale in Serpulidenröhren durch Austauschprozesse ist daher nicht auszuschließen.

Vergleiche zwischen Schalen unterschiedlicher Arten sind nur bedingt möglich. Molluskenschalen und Serpulidenröhren, aragonitisch oder calcitisch, sind außerdem von einem Proteingerüst durchzogen. Dieses kann bei der Reinigung der Proben nicht vollständig entfernt werden und hat damit ebenfalls Einfluß auf Elementkonzentrationen in einer Schale. Auch hier gilt deshalb eine eingeschränkte Vergleichbarkeit. Zusammenfassend ist eine abnehmende Vergleichbarkeit in folgender Reihe festzustellen:

- innerhalb der Schale/Röhre eines Organismus
- zwischen Organismen einer Art
- zwischen Organismen unterschiedlicher Arten (z.B. *Calyptogena/Solemya*)
- zwischen Organismen unterschiedlicher Stämme (z.B. Serpuliden/Mollusken)

Die organischen Weich- und Hartteile (Periostracum, Röhren) repräsentieren eine Varietät komplexer organischer Strukturen, die nicht detailliert bekannt sind. Ein direkter Vergleich ist daher kritisch zu betrachten, aber gleichzeitig auch die einzig praktikable Möglichkeit, eine Charakterisierung unterschiedlicher Stoffgruppen nach einem einheitlichen Schema vorzunehmen.

Die Möglichkeiten einer geochemischen Analyse von Vent-Materialien bestehen darin, unter Berücksichtigung der jeweiligen Bildungsmechanismen ein Bild der Fixierung charakteristischer Elemente und Isotopenverhältnisse in den Organismen nachzuzeichnen. Es wird so, durch Relativierung der Einzelergebnisse, eine Abschätzung des von Organismen reflektierten Stofftransports in Vent-Gebieten möglich.

Die Interpretation von Verteilungsmustern unterschiedlicher Elemente in biogenen Hartteilen besteht daher nicht in der Entwirrung der Signale in bezug auf die Zirkulation, anthropogene Einflüsse etc., sondern zunächst in der Suche nach den Faktoren, die Signale produzieren.

Folgende Lösungsansätze sind dazu möglich:

Wie erwähnt liegen die Nahrungsquellen chemosynthetischer Organismen unterhalb ihres Lebensraumes. Die Nahrungsaufnahme findet jedoch hauptsächlich oberhalb der Quelle, d.h. im Seewasser oberhalb der Austrittsstelle statt. Hier hat bereits eine Vermischung mit dem Seewasser stattgefunden. Sie ist um so größer, je größer die Entfernung zum

Austrittspunkt ist. Organismen, die an der Peripherie einer Vent-Biozönose leben, steht daher a priori nur eine verdünnte Nahrungsquelle zur Verfügung.

=> Phasen erhöhter Vent-Aktivität können Signale produzieren, wenn die Elementkonzentrationen der austretenden Wässer stark von denen des Umgebungswassers abweichen.

Die erste Annahme gilt unter der Voraussetzung, daß die Wachstumsgeschwindigkeit der Organismen, im Rahmen klassischer Wachstumskurven, konstant ist. Möglicherweise steigt sie jedoch bei erhöhtem Venting an, z.B. durch erhöhte Methanfreisetzung, die chemosynthetische Prozesse beschleunigt. In diesem Fall ergeben sich zwei mögliche Szenarien:

- a) Die relativen Elementgehalte in den Hartteilen eines Organismus sinken, bei gleichmäßigem Einbau der Spurenelemente, da erhöhtes Wachstum eine Abreicherung der Elemente im Einzugsbereich bedingt. Das Signal erstreckt sich über einen relativ großen Bereich der Schale.
- b) Die relativen Elementgehalte steigen in den Hartteilen an, da bei höherer Wachstumsgeschwindigkeit mehr Spurenelemente eingebaut werden können. In diesem Fall zeigen schmale Peaks Venting-Ereignisse an.

=> Phasen erhöhter Vent-Aktivität können durch so verursachte Schwankungen in der Wachstumsgeschwindigkeit von Organismen Signale produzieren.

Anreicherungen einzelner Elemente können Hinweise auf den Entstehungsort der Fluide geben, wenn keine physikalischen Gründe für einen abweichenden Einbau vorhanden sind.

=> Eine unterschiedliche Herkunft der Fluide kann unterschiedliche Signale erzeugen.

In den Verteilungsmustern heben sich erhöhte Werte von einem "Grundrauschen" ab. Das "Grundrauschen" repräsentiert jedoch nicht "normal-marine" Werte, da die Organismen nur in Gebieten anhaltenden Ventings leben können (unabhängig von dessen Aktivität). Jeder Abschnitt einer Schale/Röhre ist aber vom Venting geprägt. Direkte Vergleiche mit "normal-marinen"-Bedingungen sind nicht möglich, da in vergleichbaren Gebieten ohne Venting keine vergleichbaren Organismen leben können.

=> Alle Konzentrationen und Verteilungsmuster in Hartteilen der Vent-Organismen stellen per se ein Vent-Signal dar.

In jedem Schritt der Interpretation von Spurenelementdaten aus Vent-Gebieten muß also das außergewöhnliche geochemische Umfeld im Zusammenhang mit dem tektonischen Umfeld berücksichtigt werden. Die Vielfalt von Prozessen und Mechanismen, die in den Hartteilen der Organismen Signale erzeugen kann, deutet auf die Komplexität des Fluid-Venting an konvergenten Plattenrändern hin. Die Ausgrenzung signalerzeugender Prozesse sowie die Zuordnung von Signalen zu Prozessen kann nur anhand einer breiten Datenbasis erfolgen, die eine Kategorisierung der geochemischen Parameter zuläßt.

3.2 "Inventur"

Die an Vent-Material durchgeführten Spurenelementuntersuchungen gliedern sich in Gruppen von Elementen mit ähnlichen Eigenschaften:

- Strontium, als Vertreter der Nebenelemente im Carbonatgerüst
- Sulfidbildende Elemente, die in der Wassersäule eine nährstoffähnliche Verteilung aufweisen (Cu, Zn) (CHESTER 1990).
- Lithium, als diagnostischer Parameter für vulkanogene Einflüsse. Generelle Quellen für Li im Ozean sind die Freisetzung durch hydrothermale Wässer an ozeanischen Spreizungszentren und der Eintrag durch kontinentale Verwitterungsprodukte im Verhältnis von ca. 1:10 (CHAN ET AL. 1992). Senken für Li sind Basalt-Verwitterung bei niedrigen Temperaturen (CHAN ET AL. 1992) und Einbindung in authigene Tonminerale (STOFFYN-EGLI & MACKENZIE 1984). Durch die Nähe eines Spreizungszentrums (Juan de Fuca Ridge) zu dem Untersuchungsgebiet vor Oregon ist eine erhöhte Li-Verfügbarkeit in den Sedimenten gewährleistet. Durch Akkretionsprozesse kann das Li wieder freigesetzt werden.
- Barium, als diagnostischer Parameter für Upwelling. Barium stellt hier die Verbindung zwischen hoher Primärproduktion im Oberflächenwasser durch Upwelling-Prozesse und Venting-Prozessen im Sediment dar. Eine positive Korrelation zwischen Ba und Primärproduktion ist bereits seit GOLDBERG & ARRHENIUS (1958) bekannt und in Upwelling-Gebieten beobachtet worden (z.B. CALVERT & PRICE 1983). Ein erhöhter Ba-Eintrag in die Sedimente erfolgt durch abgestorbenes Phytoplankton, das Ba in hohem Maße einbaut.

Untersucht werden sollten vor allem Variationen in den Konzentrationen von Elementen aus unterschiedlichen Gruppen, um deren Zusammenhang mit austretenden Vent-Fluiden zu klären. Um für Vent-Organismen charakteristische Spurenelemente zu diagnostizieren, wurde mittels ICP-MS eine Übersichtsaufnahme einer *Calyptogena*-Schale aus dem Gebiet 1428 durchgeführt. In Anlehnung an diese Ergebnisse wurden Reihenuntersuchungen an anderen Organismen durchgeführt.

Die Konzentrationsbereiche unterschiedlicher Elemente (Tab. 3) lassen bereits eine Charakterisierung des jeweiligen Vent-Gebiets zu.

3.3 Charakteristische Spurenelemente in Vent-Organismen

Folgende Elemente können Hinweise auf Prozesse im Vent-Geschehen liefern:

Strontium: Sr-Gehalte in den untersuchten Proben sind artpezifisch und schwanken in geringem Maße. Es bestehen keine nennenswerten Unterschiede zwischen den Organismen vor Peru und Oregon. Der Sr-Einbau hängt daher hauptsächlich mit biologischen Grundfunktionen zusammen. Sr-Peaks zeichnen extreme Anreicherungen anderer Elemente nach, reagieren aber relativ unempfindlich. Ein Zusammenhang von Sr-

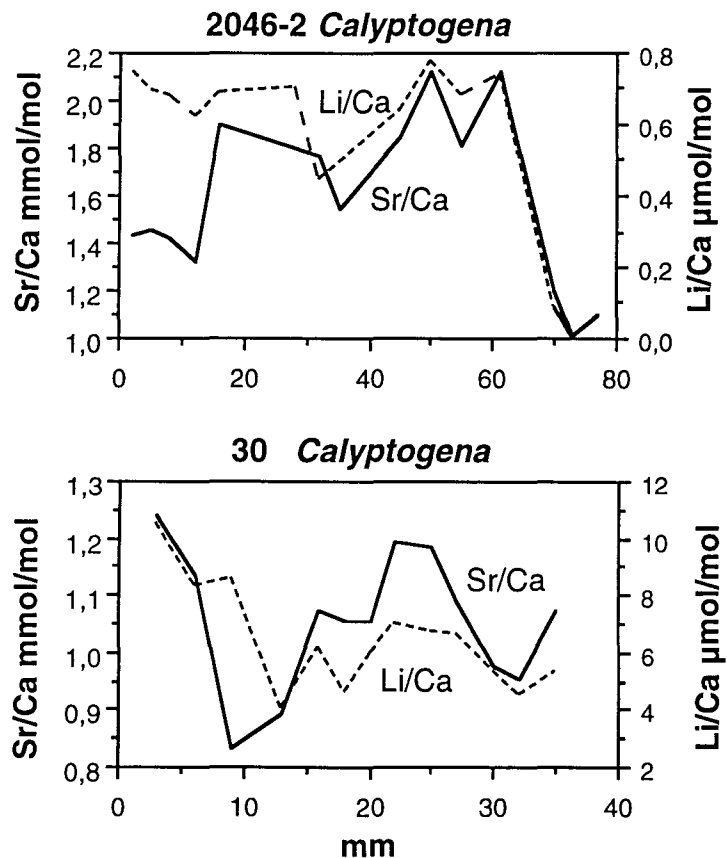


Abb. 12 Li und Sr in *Calyptogena*-Schalen aus Peru und Oregon weisen auf eine gemeinsame Herkunft beider Elemente aus Vent-Fluiden hin

CARBONATISCHE SCHALEN UND RÖHREN

OREGON

	Sr/Ca*	Ba/Ca	Li/Ca	Cu/Ca	Zn/Ca	Cd/Ca
1428 (MR)						
1428 <i>Calypptogena</i>						
2656 <i>Calypptogena</i>	1.1-1.6	10-17	1-12	1-4	1-30	
2658/1 <i>Calypptogena</i>	1-2	4-22	1-34	1-8	1-9	
2658/2 <i>Calypptogena</i>	0.7-1.6	3-10	1-61	1-10	1-9	
1900 (MR)						
2046-1 <i>Calypptogena</i>	0.1-7	2-7	1-44	<1	<1-3	
2046-2 <i>Calypptogena</i> (A)	1-2	1-8	<1	1-3	1-10	
2046-2 <i>Calypptogena</i> (I)						
2663 <i>Calypptogena</i>	<1	<1-2	1-2	<1	<1	
Bioherm (2ndR)						
2283-4 <i>Calypptogena</i> (A)	1-3	3-9	n.d.	1-9	1-38	
2283-4 <i>Calypptogena</i> (I)	1-3	8-11	n.d.	0.5-2	1-54	
2283-8 <i>Calypptogena</i> (A)	1.2-1.4	3-18	n.d.	1-6	14-106	
2283-8 <i>Calypptogena</i> (I)	1.2	3-15	n.d.	<1	1-7	

PERU

	Sr/Ca*	Ba/Ca	Li/Ca	Cu/Ca	Zn/Ca	Cd/Ca
Chiclayo						
33 <i>Calypptogena</i>		15-45	4-8	1-11	2-31	
33/1 Serpulide	3-5	17-60	12-27	2-6	19-43	
33/2 Serpulide	2.9-3.4	7-130	2-17	3-11 (250)	26-143	
Paita						
177 <i>Calypptogena</i> 1	1.3-1.6	8-204	3-16	1-18	2-14	
177 <i>Calypptogena</i> 2	2-6	1-12	1-55 (157)	1-8	1-40 (185)	
177 <i>Solemya</i> 1	5-9	3-76	5-115	2-42	1-124	
177 <i>Solemya</i> 2	5-7	9-60	1-4		1-11	
Chimbote						
8506-1 <i>Calypptogena</i>		12-73	1-2	2-25	5-315	0.02-1.26
8506-2 <i>Calypptogena</i> (A)	2-5	6-17	7-79	3-5	1-96	
8506-2 <i>Calypptogena</i> (I)	0.1-0.7 (4.2)	2-6	8-20	1-10	2-71	
30 <i>Calypptogena</i>	0.9-1.2	14-29	5-11	1-7	2-48	
30 Serpulide	3-4	11-109	10-26	4-15	38-129	
163 <i>Solemya</i> 1	2-4	6-20	7-15	1-10	1-8	
163 <i>Solemya</i> 2	5-7	22-37	2-4	4-79	4-128	
163 Serpulide	2.9-3.2	15-65	10-27	2-3	26-47	

Tab. 3 Konzentrationsbereiche von Spurenelementkonzentrationen in biogenen Hartteilen, Angaben in µmol/mol, *mmol/mol; MR-Marginal Ridge, 2ndR-Second Ridge, A-Außenschale, I-Innenschale; in Klammern angegebene Werte sind außergewöhnliche Höchstwerte

Konzentrationen und Temperaturschwankungen in Vent-Gebieten, wie sie saisonale Schwankungen in Korallen (BECK ET AL. 1992) oder Gastropoden (SCHIFANO 1984) zeigen, konnte nicht nachgewiesen werden. Für eine Beeinflussung des Sr-Einbaus durch Schwankungen in der Wachstumsgeschwindigkeit, wie es von Gastropoden bekannt ist (SCHIFANO 1984), gibt es keinen Hinweis.

Da Sr kein Upwelling-spezifisches Element ist, wäre eine vom Vent-Geschehen unabhängige Inkorporation dieses Elements in Carbonatschalen denkbar. An Site 1900 vor Oregon sowie Chimbote vor Peru ist jedoch eine hohe Korrelation mit Li festgestellt worden (Abb. 12). Da Li als diagnostischer Parameter für Venting gilt, ist anzunehmen, daß Sr in Carbonatschalen ebenso den Vent-Fluiden entstammt wie die untersuchten Spurenelemente.

Als Vergleichsgrundlage für Sr-Konzentrationen wurde eine Literaturstudie durchgeführt (Tab. 4). Daraus wird deutlich, daß der Sr-Einbau in erster Linie artspezifisch ist, also vermutlich von biologischen Grundfunktionen bestimmt.

	Struktur	Sr ppm	
<i>Arctica islandica</i>	A	740-2250	7
<i>Batillaria zonalis</i>		1387	3
<i>Calypptogena magnifica</i> (hydroth.)	A	1010	4
<i>Caryactis cor</i>	A	1479-1939	1
<i>Chicoreus capucinus</i>		1914	3
<i>Crassostrea cucullata</i>	C	663-779	1
<i>Crassostrea cucullata</i>	C	746	3
<i>Isognomon isognomon</i>		1095	3
<i>Macoma baltica</i>		2120-3390	6
<i>Monodonta articulata</i>	C&A(50-80%)	1350-1521	5
<i>Monodonta turbinata</i>	A	1480-1738	5
<i>Mytilus edulis</i>	A	660-900	2
<i>Mytilus edulis</i>	A	1160	4
<i>Patella coerulea</i>	C	1487-1693	5
<i>Planaxis sulcatus</i>		1537	3
<i>Terebralia sulcata</i>		1597	3
<i>Thais carinifera</i>	A	1397-1975	1
1428 <i>Calypptogena</i>	A	895-1420	*
2046 <i>Calypptogena</i>	A	553-1558	*
2658-1 <i>Calypptogena</i>	A	489-820	*
2663 <i>Calypptogena</i>	A	912-1414	*

Tab. 4 Strontiumkonzentrationen in Molluskenschalen. 1-Afaj & Elewe, 2-Al-Dabbas, 3-Khoo et al., 4-Roesijadi & Crecelius, 5-Schifano, 6-Seire et al.; 7-Westermarck et al. 1994; * diese Arbeit; A=Aragonit, C=Calcit

CARPENTER & LOHMANN (1992) beschreiben Sr-Gehalte in biogenen und abiogenen marinen Carbonaten in Abhängigkeit von der Präzipitationsrate. Bei schnellerem Wachstum (biogen) wird danach mehr Sr eingebaut. Bei einer Übertragung dieser Beziehung auf die untersuchten Vent-Organismen würde dies bedeuten, daß *Solemya* prinzipiell deutlich schneller wachsen würde als *Calyptogena*.

Serpuliden weisen im Gegensatz zu den untersuchten Molluskenschalen eine calcitische Kristallstruktur auf. Das Sr-Ion ist größer als das Ca-Ion. Im Calcit-Gitter wird das Kation von 6 O-Atomen umringt, im Aragonit-Gitter von 9 O-Atomen. Kationen mit größerem Radius als Ca werden daher bevorzugt in das Aragonit-Gitter eingebaut. Entsprechend sind bei gleichen Umwelt-Bedingungen höhere Sr-Konzentrationen im Aragonit als im Calcit zu erwarten. Die höchsten Sr-Konzentrationen sind hier in aragonitischen *Solemya*-Schalen gemessen worden. *Calyptogena*-Schalen weisen jedoch deutlich geringere Konzentrationen als calcitische Serpuliden-Röhren auf. Aus diesem Paradoxon, das sich an dasjenige anschließt, wonach sich Aragonit bildet, obwohl physikochemische Bedingungen eine Calcit-Bildung fordern (MORSE 1986), geht hervor, daß der Sr-Einbau in biogene Carbonate der Vent-Gebiete physiologischen Prozessen folgen muß und damit physikochemische Zwänge aufhebt.

Barium: Vor Peru sind Baryt-Ausfällungen weit verbreitet (VON BREYMAN ET AL. 1992, DIA ET AL 1993, TORRES ET AL. 1994). Z.T. sehr hohe und schwankende Konzentrationen finden sich sowohl in Mollusken als auch in Serpuliden (Abb. 13). Die hohen Ba-Gehalte (Tab. 3) deuten auf Herkunft der Fluide aus Upwelling-Sedimenten hin. Phasenweise werden höhere Ba-Konzentrationen von den Organismen eingebaut.

Auffällig sind vor allem hohe Ba-Konzentrationen in Serpulidenröhren. Im Gegensatz zu den Molluskenschalen (Aragonit) bestehen sie ausschließlich aus Calcit. Aufgrund der dichteren Struktur des Calcit wäre jedoch eher ein geringerer Einbau von Spurenelementen zu erwarten. Die Serpuliden siedeln, wie direkte Beobachtungen gezeigt haben, direkt an der Quelle. Da sie nicht an morphologische Gegebenheiten gebunden sind, sind ihnen austretende Fluide unmittelbarer zugänglich als den Mollusken, die ein Mindestmaß an Sediment "unter den Füßen" brauchen. DESBRUYÈRES ET AL. (1994) beschreiben Serpuliden als charakteristische Organismen für den äußeren Rand von (hot) Vent-Sites. Diese Charakterisierung trifft vor Peru ganz offensichtlich nicht zu, da andernfalls geringere Spurenelementkonzentrationen als in *Calyptogena* zu erwarten wären.

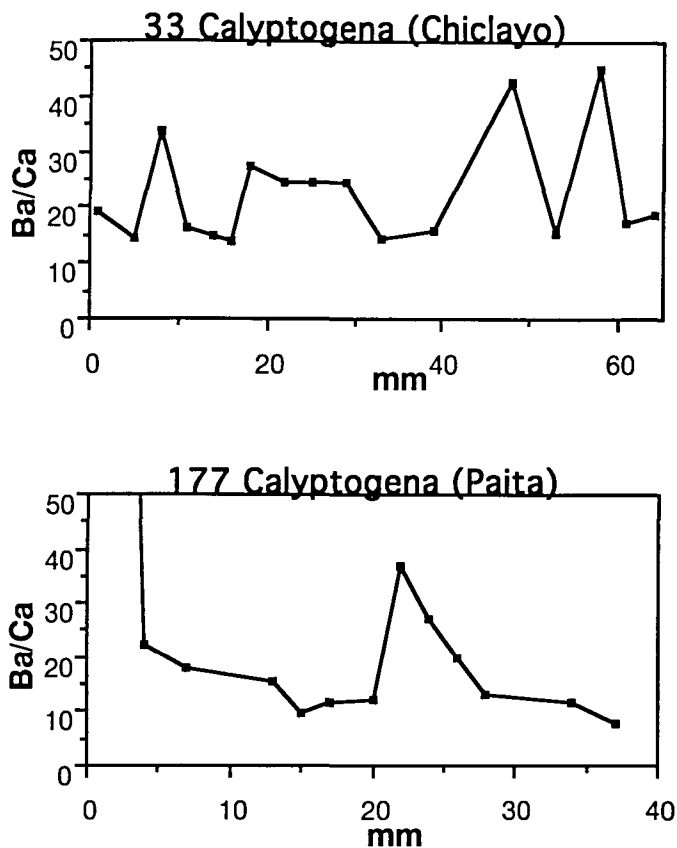


Abb. 13 Extreme Ba-Konzentrationen in Serpuliden-Sporenelement-Profilen aus Chiclayo und Paita

Hohe Ba-Konzentrationen korrelieren mit negativen ^{13}C -Werten in Paita und Chiclayo (AQUILINA ET AL 1992). Vor Peru sind Baryt-Ausfällungen in großen Mengen beobachtet worden. Ein biogener Ba-Eintrag muß angenommen werden, da sedimentäre Ba-Quellen (detritische Partikel an Tonmineralen), die durch Diagenese mobilisiert werden, nicht ausreichen (VON BREYMAN ET AL 1992).

Vor Oregon herrschen mittlere bis niedrige Ba-Gehalte in Carbonaten vor. Eine extreme Anreicherung ist bei Station 1428 festzustellen. Die Extremwerte bei *Calyptogena* 1428 kennzeichnen einzelne Punkte eines Schalenabschnittes. Von Süßwassermuscheln ist bekannt, daß sich bei entsprechender Ba-Verfügbarkeit kleine Baryt-Kristalle auf den Innenschalen bilden können, die von späteren Aragonit-Lagen überwuchert werden (FRITZ ET AL. 1990). Möglicherweise ist dieses Phänomen auch hier zu beobachten.

Baryt-Ausfällungen sind vor Oregon nicht zu beobachten. Carbonatkonkretionen weisen jedoch erheblich höhere Gehalte an Ba auf als Organismenschalen. Daraus ist zu schließen, daß der Einbau von Ba und anderen Spurenelementen in carbonatische Hartteile von Organismen nicht allein physikochemischen Zwängen folgt, sondern biologisch kontrolliert wird. In anorganischen Krustenbildungen ist demgegenüber eine direktere Beziehung der Spurenelementkonzentrationen der Hartteile zu denen austretender Fluide zu erwarten. Insgesamt ist eine phasenweise verstärkte Aufnahme von Ba durch Organismen zu beobachten, die jedoch deutlich geringer als vor Peru ist.

In der Verteilung von Ba in den untersuchten Organismen werden die Ablagerungsbedingungen der jeweiligen Gebiete reflektiert. Vor Peru sedimentieren "reine" Upwelling-Sedimente, während vor Oregon der zusätzliche erhebliche Eintrag detritischen Materials das Signal abschwächt.

Zink, Kupfer: Vor Peru sind relativ hohe und schwankende Gehalte an Cu und Zn zu beobachten. Dabei wird Zn in Carbonate in wesentlich höheren Konzentrationen eingebaut (Tab. 3) als Cu. In organischem Material liegen Cu und Zn in vergleichbaren Konzentrationen vor (Tab. 5). Die Verteilungsmuster beider Elemente stimmen meist gut überein.

Cu und Zn sind "nutrient-type"-Elemente und in Upwelling-Gebieten in erhöhtem Maße verfügbar. Extreme Anreicherungen dieser Elemente sind besonders in Serpulidenröhren zu beobachten (Abb. 14). Sie zeigen die Nähe der Organismen zu den austretenden Vent-Fluiden an. Anreicherungen von Zn und Cu in Vent-Fluiden zeichnen die hydrographischen Bedingungen nach, unter denen das Sediment, denen sie entstammen, abgelagert wurde.

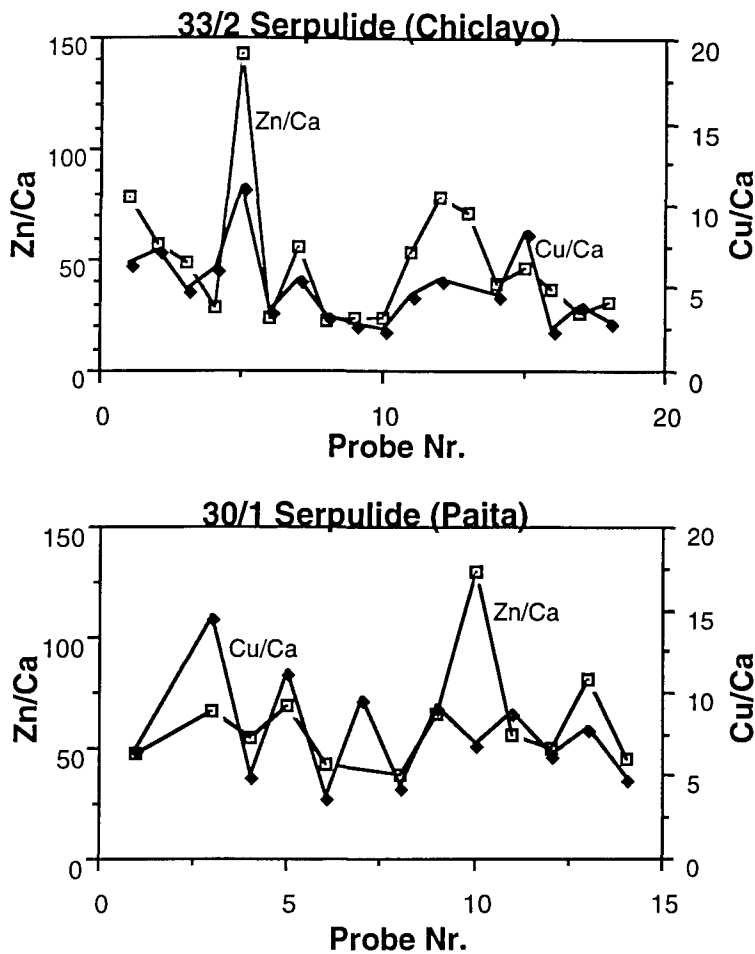


Abb. 14 Cu- und Zn-Profile von Serpulidenröhren. Konzentrationen entsprechen $\mu\text{mol}/\text{Mol}$; die Profile umfassen jeweils einen Abschnitt von ca. 6 cm mit etwa gleich großen Probensegmenten.

Lithium: Vor Oregon sind Li-Gehalte z.T. sehr hoch. Sie schwanken parallel mit Cu und Zn. In Fluiden ist eine Anreicherung über einen definierten Zeitraum nachweisbar (parallel zu CH_4 -Konzentrationsanstiegen, s.u.), was auf einen Austritt von Li mit den Vent-Fluiden hinweist. Lithium wird im Ozean hauptsächlich bei der Reaktion von Basalt mit Meerwasser an mittelozeanischen Rücken freigesetzt (CHAN ET AL. 1992). Im Sediment können Anreicherungen durch Einlagerung vulkanischer Aschenschichten auftreten.

Auch hier zeigen sich die Charakteristika des Ablagerungsraumes in den Konzentrationsbereichen vorherrschender Elemente. In allen untersuchten Schalenprofilen vor Peru überwiegt Ba Li (Abb. 15). Das umgekehrte Verhältnis ist vor Oregon zu beobachten.

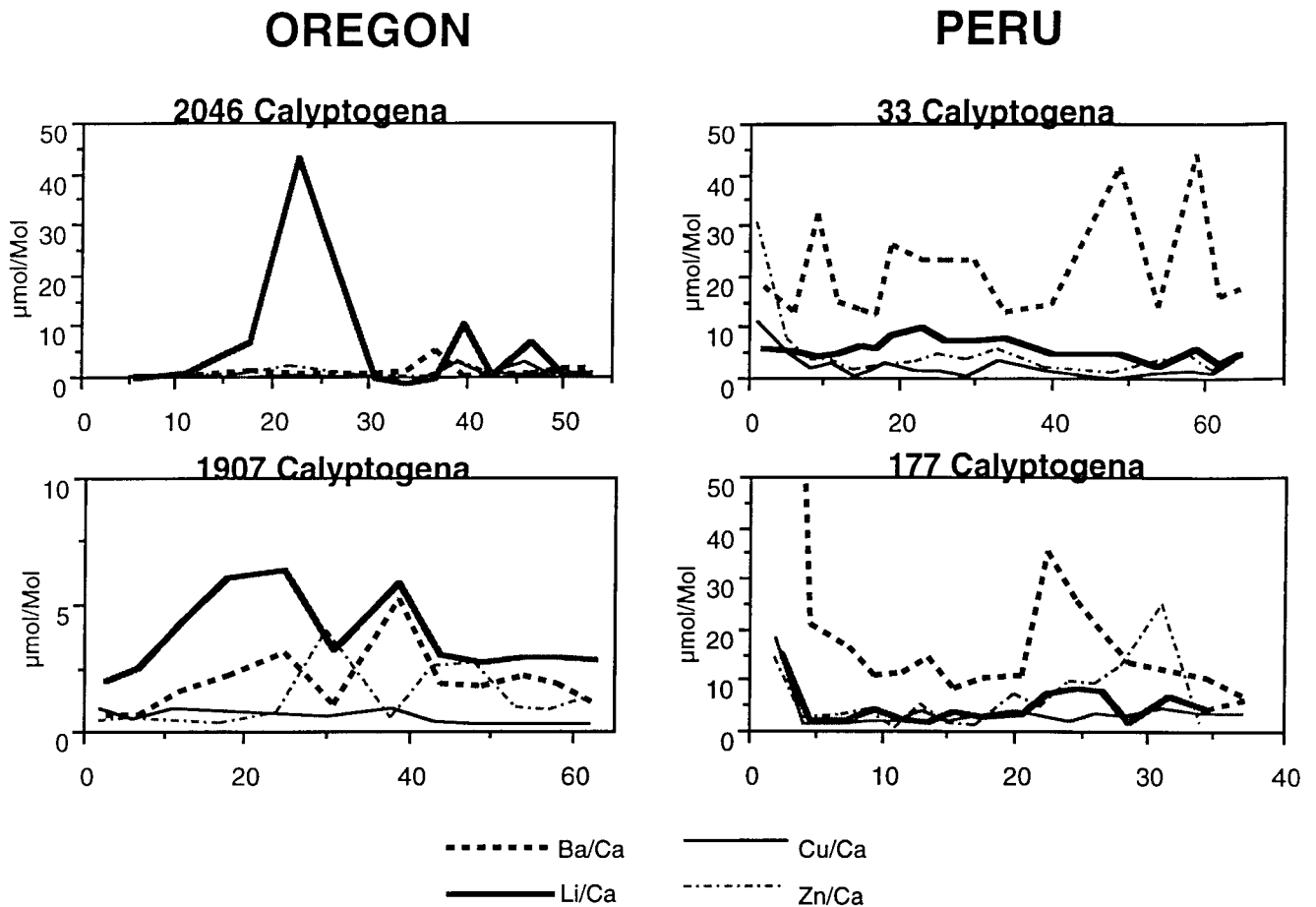


Abb. 15 Spurenelementprofile vor Peru und Oregon. Vor Peru überwiegt Ba, vor Oregon Li

Vor Oregon sind die Spurenelementsignale in den Hartteilen der Organismen weniger ausgeprägt als vor Peru. Lithium ist hier das dominierende Element. Dadurch wird die Herkunft der Fluide aus Schichten mit vulkanoklastischen Sedimenten belegt. Durch den in Astoria mündenden Columbia-River werden große Schwebstoffmassen eingetragen. Der Fluß entwässert die vulkanischen Kaskaden sowie das ebenfalls vulkanische Küstengebirge (Coastal Range). Die Schwebstoffe bilden daher die Quelle für das Lithium.

Aus den Untersuchungen von Spurenelementverteilungen wird deutlich, daß, obwohl die untersuchten Organismen von klimatischen Bedingungen unabhängig sind, dennoch klimabedingte Sedimentcharakteristika widerspiegelt werden. Der

klimate/umweltbedingte Einfluß zeigt sich in der Hydrographie und den Ablagerungsbedingungen, die die Ausgangssituation für charakteristische Sedimentation bilden. Die Herkunft der Fluide kann somit bestimmt werden, wenn die Sedimente bekannt sind, oder aber es können Aussagen über Umweltbedingungen zur Ablagerungszeit des Sedimentpakets gemacht werden, wenn austretende Fluide ihre Prägung an die Organismen weitergeben (Abb. 16).

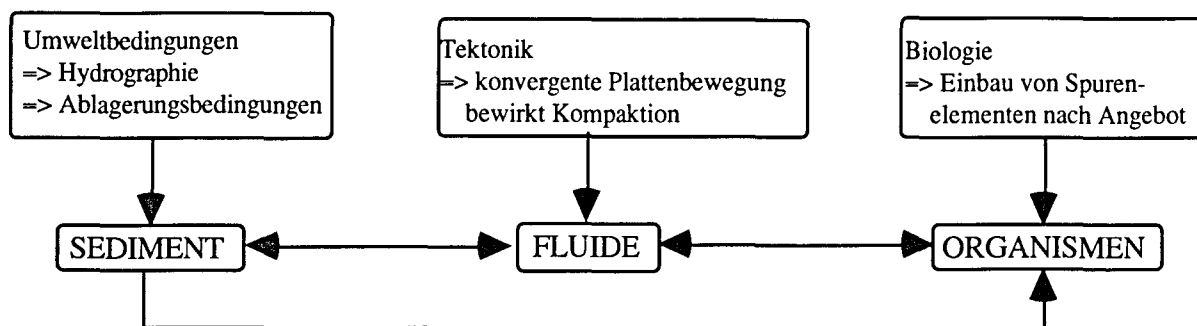


Abb. 16 Wechselwirkungen, die charakteristische Spurenelementsignale erzeugen

Organische Materialien

Neben carbonatischen Hartteilen wurden auch die Röhren von *L. barhami* sowie Weichteile von Organismen aus allen Arbeitsgebieten untersucht. Cu und Zn sowie in den Carbonaten kaum nachweisbare Elemente, wie Pb und Cd, liegen in organischer Matrix in erheblichen Konzentrationen vor.

Dies ist aufgrund der komplexen Bindungsformen nicht erstaunlich. Da die Konzentrationen jedoch mit denen in Organismen aus anthropogen stark belasteten Gebieten (TER JUNG 1992) vergleichbar sind, zeigen sie eine Anreicherung dieser Elemente in den Vent-Fluiden an. Es ist jedoch zu beachten, daß Elementkonzentrationen in biologischem Material nicht ausschließlich von deren Verfügbarkeit abhängt. SPAARGAREN (1991) unterscheidet zwischen biologischer und "environmental" Verfügbarkeit von Elementen in Abhängigkeit von der Elektronenkonfiguration. Danach erreicht das Verhältnis biologische/"environmental"-Verfügbarkeit für Cu und Zn Werte um ca. 10^4 , d.h. es findet generell ein überproportionaler Einbau statt.

		Cu ppm	Ba ppm	Zn ppm	Pb ppm
Chiclayo					
33	Fuß	11,8	300	4,1	
33	Gastropoden	5592		47,8	
33	Limpid	931		80,1	
33	Serpulide	146		39,6	
33/1	Serpulide	162		14,2	
33/3	Serpulide	147		44,8	
Chimbote					
8506	Kiemen	72		320	
8506	Mantel	24		360	
Bioherm					
2283-11	Fuß	21,3		38,3	
2283-11	Kiemen	202		18,3	
2283-3	Mantel	158		8,9	
2283-3	Muskel	34,1	14,0	51,8	
2283-4	Mantel			6,9	
2283-4	Muskel	55,8		10,4	
2283-5	Fuß	39,5	9,4	5,6	
2283-5	Kiemen	159		3,3	
2283-5	Muskel	42,5	7,1	21,8	
2283-8	Kiemen	149	14,3	26,9	
2283-8	Muskel	112		45,0	
2283-9	Kiemen	712	36,5	28,1	
2644-1	Mantel	266	2,7	84,1	2,3
2644-1	Sipho	30,0	2,2	63,6	2,5
2644-2	Kiemen	57,9	1,7	56,9	30,3
2645	Fuss	9,7	0,5	266	7,4
2645	Mantel	40,1	2,9	150	110
2645	Muskel	3,3	0,6	286	4,8
2645	Sipho	39,0	0,0	649	43,6
Marginal Ridge					
2656-2	Fuß	54,1		0,7	16,8
2656-2	Kiemen	139		10,2	11,4
2656-2	Mantel	32,5	4,5	57,1	1,3
2656-2	Sipho	24,6		0,5	10,5
2656-4	Fuss	16,4	0,1	491	1,8
2658-1	Sipho	29,4	0,4	62,2	0,2
2658-2	Fuß	22,2		0,2	3,5
2658-2	Kiemen	194		14,2	12,7
2658-2	Mantel	68,5		0,5	3,8
2658-2	Sipho	41,7		0,7	4,0
2663	Fuß	16,4		1,5	2,5
2663	Kiemen	104	0,7	51,6	13,7
2663	Mantel	81,5		7,9	5,4
2663	Sipho	18,5		1,6	5,2

Tab. 5 Spurenelement-Konzentrationen in Weichteilen

Li ist in dem untersuchten organischen Material kaum nachweisbar, Ba weist vergleichbar niedrige Konzentrationen auf. Grundsätzlich sind Elementkonzentrationen in den Kiemen der Mollusken besonders hoch. Auffällig sind auch extreme Konzentrationen in Kleinorganismen (Limpets, Gastropoden) aus dem Chiclayo-Canyon.

Die Spurenelementkonzentrationen in Weichteilen von Organismen können, ebenso wie Konzentrationen in Hartteilen, einen Anhaltspunkt für die Verfügbarkeit von Spurenelementen in einem bestimmten Milieu geben. Im Arbeitsgebiet Bioherm vor Oregon dominieren hohe Cu und Zn-Gehalte, Ba spielt eine untergeordnete Rolle. Da in diesem Gebiet H_2S in den Porenwässern nachgewiesen wurde, ist es möglich, daß Cu und Zn in den Weichteilen der Organismen in sulfidischer Form vorliegen. Zn- und Cu-Ionen bilden in Verbindung mit H_2S Zinkblende (ZnS) bzw. Kupferglanz (Cu_2S). Bei einer Reaktion innerhalb des Körpers eines Organismus verbleiben die Kristalle in den Weichteilen. Beim Öffnen der Klappen entströmt den Organismen daher ein strenger schwefeliger Geruch. Entsprechend sind nachgewiesene Spurenelemente nicht zwangsläufig im Gewebe gebunden.

Elementkonzentrationen in Weichteilen von Mollusken geben Hinweise auf Konzentrationen in den die Schalen durchziehenden Glykoproteinen. Diese können bei der Reinigung nicht vollständig aus den Schalen entfernt werden. Ein schwankender Anteil von Glykoproteinen kann daher Konzentrationsschwankungen in Carbonaten vortäuschen. Die niedrigen Konzentrationen von Ba und Li unterstützen daher die Annahme einer Dominanz in den Untersuchungsgebieten. Signale in carbonatischen Hartteilen sind nicht durch Anreicherungen in organischer Substanz verfälscht. Da die untersuchten Schalen jedoch eine sehr kompakte Struktur aufweisen, tritt ein eventueller Effekt vermutlich gleichmäßig und minimal auf. Er wird daher bei weiteren Betrachtungen vernachlässigt.

Zum Vergleich der Ergebnisse von Vent-Gebieten mit anderen aquatischen Milieus (Hot Vents und klimatisch beeinflusste Gebiete) wurde ein Literaturvergleich vorgenommen. Da Angaben auch für Carbonate meist nur in ppm vorliegen und Ca nicht analysiert wurde, sind die Konzentrationen einiger *Calyptogena*-Schalen aus dieser Arbeit zum Vergleich in ppm umgerechnet worden und Literaturangaben gegenüber gestellt.

Carbonatische Schalen

				Fe ppm	Zn ppm	Cu ppm	Mn ppm	Ba ppm	Li ppm	Pb ppm
21N Ridge	1	<i>Calypptogena</i>	Schale	54,0	135		56,0		2,0	
Tenryu Canyon	2	<i>Calypptogena</i>	Schale	97,0	2,5		8,0	483		
Japan Trench	2	<i>Calypptogena</i>	Schale	50,0	6,0		6,0	582		
Japan Trench	3	<i>Mytilus</i>	Schale			130				
Japan Trench	4	<i>Calypptogena</i>	Schale		3,4	5,9		8,9		<3,1
	6	Muschel	Schale		100	3,0				<2,9
NW Europa	8	<i>A. islandica</i>	Schale	0,1-410	0,03-1,2	2-4	1-12	2-52		
Finnland	7	<i>M. baltica</i>	Schale		0,1-24	2,6-7,1		15-50		0,07-0,1
1428	*	<i>Calypptogena</i>	Schale		0-17	2-11		3-4011	0,5-0,7	0,1-1,4
2046	*	<i>Calypptogena</i>	Schale		<1	<0,2		0,1-0,8	<0,1	
2658-1	*	<i>Calypptogena</i>	Schale		0,1-3,6	0,2-2,6		4-15	0,1-0,5	
2663	*	<i>Calypptogena</i>	Schale		0,6-4,3	0,1-1		2,5-6,5	<0,1-0,5	

Organische Röhren und Weichteile

				Fe ppm	Zn ppm	Cu ppm	Mn ppm	Ba ppm	Li ppm	Pb ppm
Guayamas	1	<i>Riftia</i>	Röhre	150-770	130-372	9-39	4-31	35-94	2-2,5	
Japan Trench	1	<i>Calyptogena</i>	Mantel	302	117	150	13,3	85		3,3
Ostsee	5	<i>Mytilus</i>	gesamt		150-900	5-19				1-5,8
Japan Trench	1	<i>Calyptogena</i>	Muskel	118	343	47,0	<5	<21		1,9
21N Ridge	4	<i>Calyptogena</i>	Kiemen	1931	1560	219				23
21N Ridge	4	<i>Calyptogena</i>	Mantel	302	1772	150				3,3
21N Ridge	4	<i>Calyptogena</i>	Muskel	118	343	47				1,8
1428-7	*	<i>L. barhami</i>	Röhre	179	6-68	12-82	2-15	1-50		0-13,4
1428-14	*	<i>L. barhami</i>	Röhre		28-116	7-49				
1428-24	*	<i>L. barhami</i>	Röhre		26-104	9-22				
2656	*	<i>L. barhami</i>	Röhre		5-16	7-53				
2663	*	<i>L. barhami</i>	Röhre		4-18	9-47		2-50		

Tab. 6 Vergleich von Literaturdaten über Spurenelementkonzentrationen in carbonatischen und organischen Materialien.

1-Lukashin et al. 1990, 2-Boulègue et al. 1987, 3- Al Dabbas et al. 1984, 4- Roesijadi & Crecelius 1984

(Mittelwerte) , 5- ter Jung 1992, 6- Brooks & Rumsby , 7- Seire et al. 1994,

8- Westermarck et al. 1994 *- Diese Arbeit

Die vorliegenden Spurenelementanalysen aus Weichteilen von Organismen stellen keine vollständige Bestandsaufnahme dar. Vielmehr sollte ein Überblick über Konzentrationsbereiche und Variabilität der Elementkonzentrationen in den Arbeitsgebieten gewonnen werden. Aus den Ergebnissen sind folgende Schlußfolgerungen zu ziehen:

- Spurenelementkonzentrationen in Weichteilen der Organismen von "cold seeps" sind mit denen anthropogen beeinflusster Organismen vergleichbar (Tab. 6). D.h. der Einbau von Spurenelementen geht über das biologisch notwendige Maß hinaus, in Abhängigkeit von den Umweltbedingungen. Sie sind meist geringer, als in Hot Vent-Gebieten.
- Die für die Arbeitsgebiete wichtigen diagnostischen Parameter Ba und Li der Carbonate sind in Weichteilen nicht angereichert.
- Die Anreicherung von Spurenelementen in Weichteilen hängt stark von biologischen Prozessen ab. Z.B. Pb ist in carbonatischen Hartteilen kaum nachweisbar, in Weichteilen jedoch in erheblichen Konzentrationen vorhanden.

Spurenelementprofile in *L. barhami*

Die Röhren von *L. barhami* wurden sequentiell beprobt, gereinigt, aufgeschlossen und analysiert. Aus der Struktur der Röhren war bekannt, daß jeder Röhrenabschnitt Ablagerungen aus mehreren Wachstumsschüben enthält (s.o.), also eher eine Zeitspanne als einen Zeitpunkt repräsentiert. Die Einbaumechanismen von Spurenelementen in organische Röhren sind nicht bekannt. Schwankungen der Konzentrationsbereiche müssen daher nicht zwangsläufig in einer linearen Beziehung zu den Konzentrationen im umgebenden Wasser stehen. Vergleiche von Röhrenprofilen aus unterschiedlichen Gebieten deuten darauf hin, daß Veränderungen des geochemischen Milieus ebenso wie in Muschelschalen aufgezeichnet werden.

Als Übersichtsaufnahme wurde eine Röhre von *L. barhami* von Site 1428 auf die Elemente Zn, Cu, Pb, Cd und Ba untersucht. Bei allen Elementen wird deutlich, daß der Chemismus der Röhre nicht homogen ist, sondern auch hier Phasen erhöhter Elementanreicherungen zu beobachten sind (Abb. 18). Zn und Cu zeigen dabei langfristig einen gegenläufigen Trend. Zn nimmt im älteren Teil der Röhre zu, Cu ab. Bei Ba wird der phasenhafte Charakter der Anreicherungen besonders deutlich. Cd und Pb weisen geringe Konzentrationen auf, Cd z.T. unterhalb der Nachweisgrenze. Extreme Anreicherungen von Cd sind möglicherweise auf Kontamination zurückzuführen.

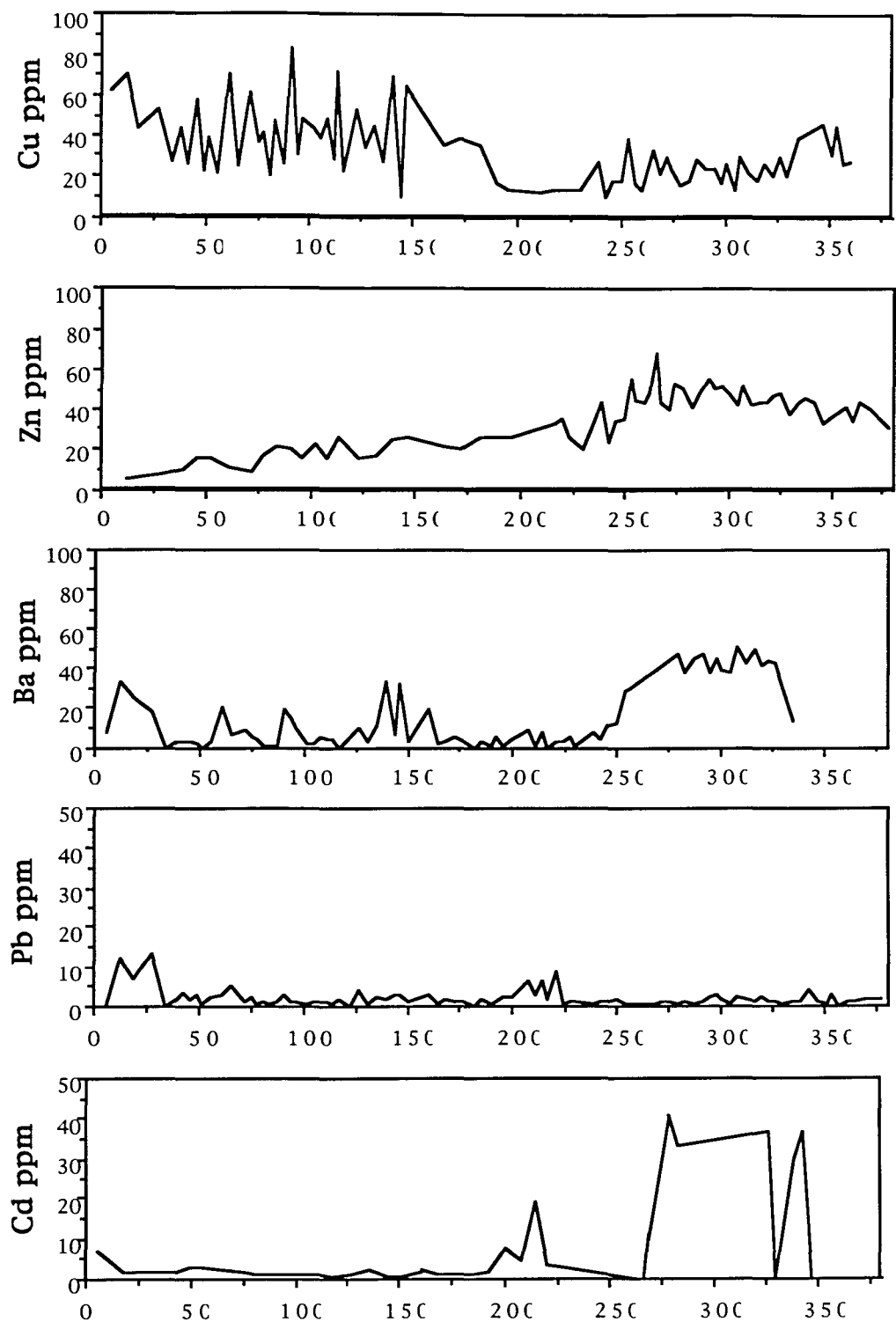


Abb. 17 Spurenelementkonzentrationen in *L. barhami* 1428, Marginal Ridge, Oregon; x-Achse: mm von der Mündungsöffnung

Populationen von *L. barhami* sind in den Untersuchungsgebieten nur im Bereich des Marginal Ridge vor Oregon, an den Sites 1428 (2656) und 1900 (2663) beobachtet worden. Während der Tauchgänge im Herbst 1993 wurden Organismen aus beiden Gebieten geborgen. Ein Vergleich der Röhrenprofile von Cu und Zn zeigt signifikante Übereinstimmungen der Verteilungsmuster. Eine Korrelation der Profile deutet jedoch auf geringe Schwankungen der Wachstumsgeschwindigkeiten hin.

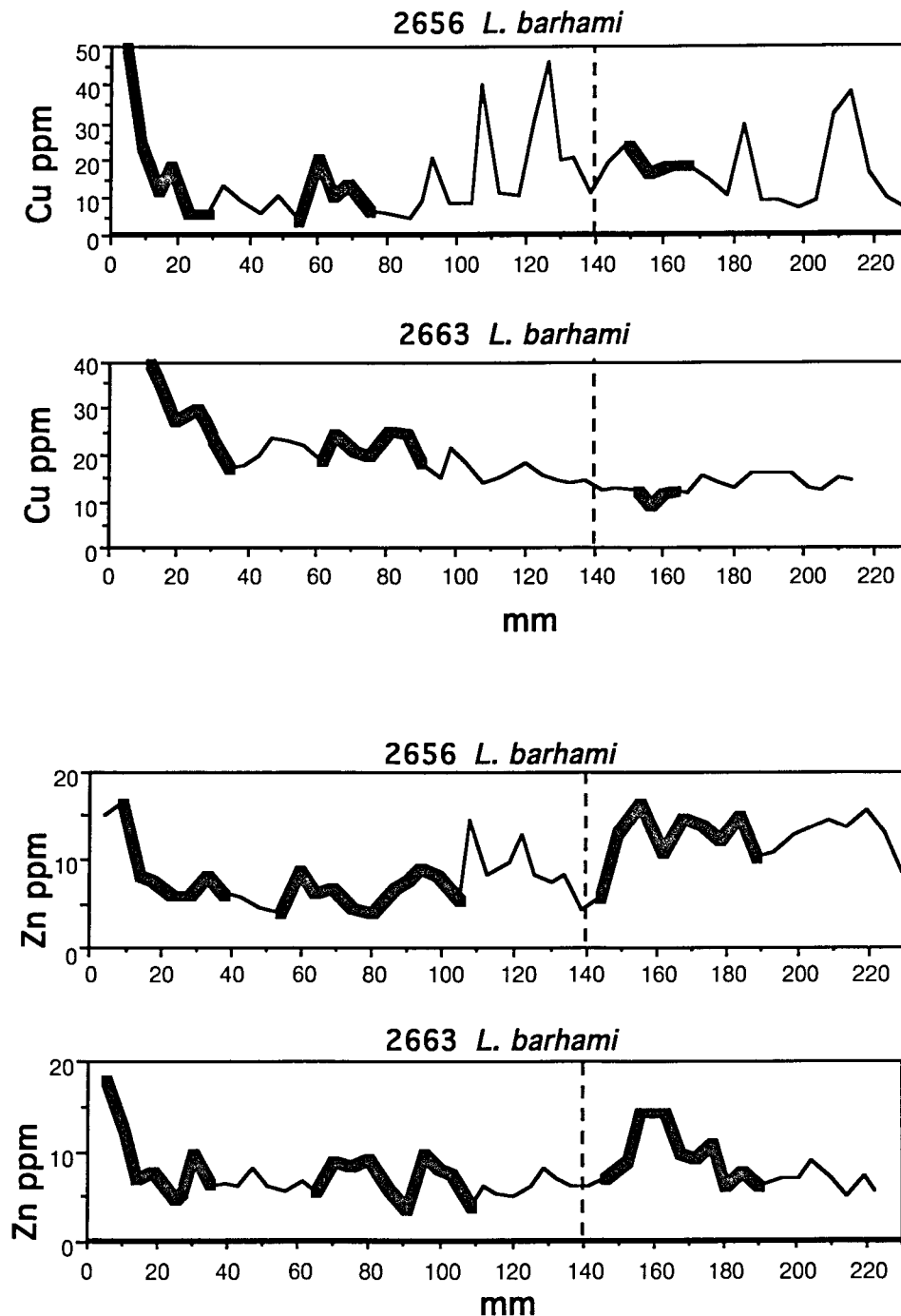


Abb. 18 Korrelation zweier Röhrenprofile von *L. barhami*, Site 1428(2656) und 1900(2663), Marginal Ridge, Oregon. Hervorgehoben sind Abschnitte, die sich direkt vergleichen lassen.

Die Konzentrationsbereiche der Elemente in den Röhren zeigen ebenfalls eine gute Übereinstimmung. Absolute Werte sind bei Site 1900 etwas niedriger als bei 1428.

Die Gebiete 1428 und 1900 stehen oberflächlich weder in Kontakt miteinander noch befinden sie sich in unmittelbarer Nähe zueinander. Die Spurenelementverteilungen in den einzelnen Röhren aus unterschiedlichen Gebieten sind dennoch nahezu identisch. Sie beweisen damit die Speisung beider Vent-Sites aus derselben Quelle sowie die Manifestation von Vent-Signalen in den organischen Röhren.

An Site 1428 wurden 1984 und 1993 Kolonien von *L. barhami* beprobt. Eine Korrelation der bearbeiteten Profilabschnitte ist jedoch nicht ohne weiteres möglich (Abb. 5).

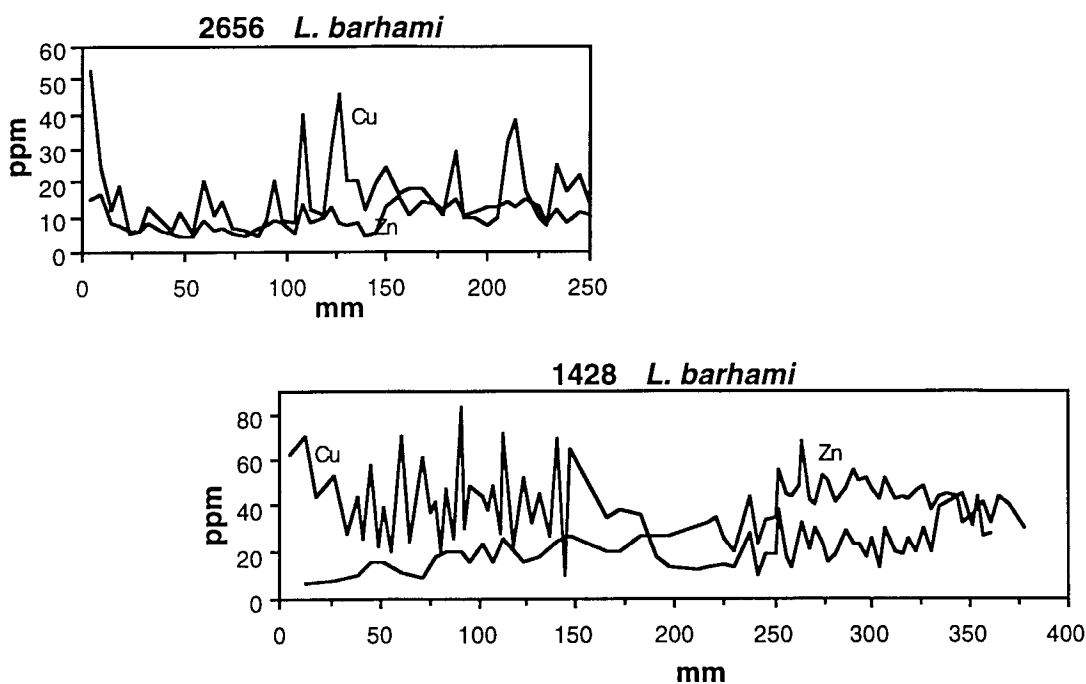


Abb. 19 *L. barhami* 1428 und 2656 wurden im Abstand von 9 Jahren an derselben Stelle beprobt

Auch die Röhren von *L. barhami* sind offensichtlich wertvolle Datenspeicher für Spurenelemente. Sie können langfristige Trends der Veränderung des sie umgebenden Milieus aufzeichnen. Vergleichende Untersuchungen an Röhrenabschnitten von drei Individuen aus derselben Kolonie (1428) haben gezeigt, daß unterschiedliche Organismen identische Signale aufzeichnen. Da die Mechanismen des Einbaus von Spurenelementen hier nicht bekannt sind, ist es ratsam, mehrere Organismen parallel zu analysieren und die Ergebnisse zu mitteln. Für eine detaillierte Betrachtung und Korrelation der Röhrenprofile

sind zukünftig möglichst viele und möglichst lange Röhren zu analysieren, um so eine zuverlässige Datenbasis zu schaffen.

3.4 Signale stabiler Isotope

Die Analyse der stabilen Isotope des Kohlenstoffes (C) und des Sauerstoffes (O) als geochemische Methode geben wichtige Hinweise auf Umweltbedingungen. Der Gehalt verschiedener stabiler Isotope wird angegeben als Abweichung der Probe bezüglich $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ bzw. $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$ von einem Belemniten der PeeDee-Formation (PDB), der als international anerkannter Standard gilt. $\delta^{18}\text{O}$ und $\delta^{13}\text{C}$ sind aussagekräftige Parameter zur Identifikation von Quellen und Senken im Ozean.

$\delta^{13}\text{C}$ gibt wertvolle Hinweise auf die Zirkulation organischen Kohlenstoffes im Ozean (DRUFFEL & WILLIAMS 1992 + REF.). $\delta^{18}\text{O}$ kommt eine besondere Bedeutung bei der Bestimmung von Paläotemperaturen zu. EPSTEIN ET AL. stellten 1953 eine Temperaturskala vor, die durch Sauerstoffisotope in Carbonaten bestimmt war. $\delta^{18}\text{O}$ -Signaturen geben danach Aufschluß über Temperaturbedingungen während der Entstehung von Carbonaten. Beide Parameter spielen für paläoozeanographische Rekonstruktionen eine wichtige Rolle.

Die Interpretation von Daten stabiler Isotope (O,C) an Vent-Organismen erfordert andere Ansätze als die Interpretation in bezug auf paläoozeanographische Fragestellungen. Vents zeichnen sich durch Lebensgemeinschaften aus, die an die jeweiligen speziellen Nahrungsquellen ihres Lebensraumes angepaßt sind. Damit sind die Organismen von den großräumigen Umweltbedingungen relativ unabhängig und reflektieren diese entsprechend nicht oder kaum (evtl. geringer Einfluß durch Strömungen) im Isotopensignal ihrer Hartteile. Durch die Aufzeichnung des Vent-Milieus sind einzigartige Möglichkeiten der Interpretation gegeben.

Die vor Peru und Oregon beobachteten und beprobten Vent-Organismen entstammen Tiefen von 700 m bis 4700 m Tiefe. Sie sind damit von saisonalen Schwankungen wie Lichtintensität und Oberflächentemperatur unabhängig. Schwankungen von $\delta^{18}\text{O}$ und $\delta^{13}\text{C}$ in den Hartteilen der Organismen werden daher bedingt durch den ontogenetischen Reifeprozess oder veränderte Nahrungszufuhr bzw. damit in Zusammenhang stehende Veränderungen der Stoffwechselaktivität.

Als Ausgangspunkt für die Interpretation der Signale müssen folgende Randbedingungen bekannt sein:

- Quellen für C und O: gelöstes H₂O, CO₂, HCO₃, CO₃, Stoffwechselprodukte von Organismen und Symbionten (aus biogenem CH₄), letztere zeichnen sich durch extrem geringe $\delta^{13}\text{C}$ -Werte aus.
- Isotopenverhältnisse der Quellen: Meerwasser, Vent-Fluide (extrapoliert aus Probenkammermessungen) (s. Tab. 10).
- Fraktionierungsprozesse beim Einbau von C und O; Fraktionierung kann sowohl durch physikalische als auch durch biologische Prozesse bewirkt werden.
- Art der Symbionten: Abschätzung von deren Wirkungsgrad in bezug auf das Isotopensignal; Symbionten bevorzugen die leichteren Isotope von O und C. Detaillierte Untersuchungen der Vent-Organismen sind nicht bekannt.
- Generelle Trends im Isotopensignal über den gesamten Reifeprozess des Organismus: Vergleich mit Organismen aus anderen Lebensräumen; von Mollusken ist bekannt, daß sie im juvenilen Stadium, bedingt durch erhöhte Stoffwechsel-Aktivität, bevorzugt leichtere Isotope einbauen (WEFER 1985).
- Abschätzungen über das Alter bzw. das Wachstum der zu untersuchenden Organismen. Das Alter der Organismen in Vent-Gebieten kann bisher nur grob geschätzt werden (s. Kap. 5).

Calyptogena

Für *Calyptogena* liegen bereits einzelne Isotopenprofile vor (KILLINGLEY ET AL. 1980, KULM ET AL. 1986, RIO ET AL. 1992, SAINO & OTHA 1985, NIITSUMA ET AL. 1989). Die in Bivalven in marinem Flachwassermilieu (*Tridacna*, *Arca*, *Pinna*, *Pecten*) beobachteten saisonalen Schwankungen der Isotopenwerte (WEFER 1985, WEFER & BERGER 1991, ROMANEK & GROSSMANN 1989) sind bei *Calyptogena* nicht zu erwarten. RIO ET AL. (1992) beschreiben stabile Isotope in Muschelschalen als gute Datenspeicher für Venting-Prozesse an Hot Vents. Signale von O und C schwanken in Abhängigkeit von der Temperatur der Vents.

Nach Kenntnis der Isotopenverhältnisse im C- und O-Pool der Vents und des Umgebungswassers sowie der Fraktionierung können vom Vent-Wasser abweichende Werte in der Schale als Mischwerte aus Vent- und Seewasser interpretiert werden. Zusätzlich muß der Einfluß der Symbionten berücksichtigt werden.

$\delta^{18}\text{O}$ -Werte müßten nach dem bisherigen Kenntnisstand relativ konstant bleiben, da die sedimentären Vents keine erhöhte Temperatur gegenüber dem Bodenwasser haben.

In allen bisher untersuchten Bivalven wurde ein Isotopeneffekt in Abhängigkeit vom Ontogeniestadium beobachtet (WEFER 1985, ROMANEK & GROSSMANN 1989, JONES ET AL. 1986, WEFER & BERGER 1991). Dabei sinkt der $\delta^{13}\text{C}$ -Wert bei Erreichen der

Geschlechtsreife sprunghaft ab und verbleibt auf einem niedrigeren Niveau bis zum Lebensende. Es findet also aus biologischen Gründen eine stärkere Abweichung vom isotopischen Gleichgewicht statt. Diese Abweichung darf nicht mit Veränderungen im C-Pool verwechselt werden und findet bei jedem Organismus zu einem individuellen Zeitpunkt statt. Photosynthese betreibende Organismen zeichnen im ersten Lebensabschnitt vollständige saisonale $\delta^{18}\text{O}$ -Zyklen auf, während sie im zweiten Lebensabschnitt nur die kühlere Jahreszeit reflektieren, da in der wärmeren kein Carbonat gebildet wird (WEFER 1985). Insgesamt erfolgt im zweiten Lebensabschnitt ein langsames Wachstum. Regelmäßig wiederkehrende Ereignisse haben daher scheinbar eine höhere Frequenz.

Ein weiterer Faktor, der bei *Calyptogena* Isotopenverhältnisse beeinflussen kann, sind symbiontische Bakterien. *Calyptogena* beherbergt chemoautotrophe Bakterien. Diese sind nach Untersuchungen von RUBY ET AL. (1987) stark ^{12}C -selektiv, sogar in höherem Maße als photoautotrophe Einzeller.

Um also einen generellen Trend in der Verteilung von $\delta^{18}\text{O}$ und $\delta^{13}\text{C}$ festzustellen, müssen mehrere Schalen aus einem Gebiet von Organismen unterschiedlichen Alters hochauflösend untersucht werden. Nur so können biologische von Umwelt-bezogenen Abweichungen unterschieden werden.

Molluskenschalen weisen charakteristische Wachstumsmuster auf, die sich in der Signatur der stabilen Isotope widerspiegeln. Die regelmäßige Wiederkehr der Jahreszeiten bedingt eine zyklische Variabilität (WEFER & KILLINGLEY 1980) von $\delta^{18}\text{O}$, bedingt durch Temperaturschwankungen und $\delta^{13}\text{C}$, bedingt durch Stoffwechselaktivität. Da die äußeren Bedingungen hier andere sind, sind in Vent-Gebieten andere Wachstumsmuster zu erwarten.

***Lamellibrachia*, Vestimentifera**

Für die chitinigen Hartteile von Röhrenwürmern, wie *L. barhami*, liegen bislang keine systematischen Untersuchungen stabiler Isotope vor. Einzelne Messungen an der Röhre von SAINO & OTHA (1989) sowie KULM et al. (1986) deuten darauf hin, daß sich auch hier die chemoautotrophe Ernährungsweise der Organismen durch Symbionten in den Hartteilen widerspiegelt. Die bisherigen Messungen sind jedoch nur Einzelwerte und lassen daher keine Rückschlüsse auf die Bandbreite möglicher Schwankungen zu (Tab. 8).

Die Interpretation von Daten stabiler Isotope von *L. barhami* erfordert statistisch signifikante Messreihen, die Aussagen über generelle Tendenzen der Isotopenanreicherung über den Zeitraum der Ontogenie eines Individuums zulassen.

Krusten

Geringe $\delta^{13}\text{C}$ -Werte (bis $-66,7\text{‰}$ PDB, Tab. 7) sind von Krustenbildungen der Vent-Gebiete vor Oregon bekannt (RITGER ET AL. 1987). Sie implizieren Methan als C-Quelle (HUDSON 1977, RITGER ET AL. 1987). $\delta^{18}\text{O}$ -Werte schwanken hingegen im Bereich mariner Carbonate. Da sie keine Temperaturschwankungen reflektieren, deuten sie auf komplexere Zusammenhänge hin.

Serpuliden

Isotopenuntersuchungen an Serpuliden aus Vent-Gebieten liegen bisher nicht vor. Von den untersuchten Serpuliden sind keine Symbionten bekannt. Sie sind daher vergleichbar mit Serpuliden aus untermeerischen Höhlen. An diesen wurden zyklisch schwankende Isotopenvariationen beobachtet, die nur bedingt durch saisonale Effekte zu erklären sind (VIDETICH 1986). $\delta^{18}\text{O}$ -Effekte werden als Gleichgewichts-Fraktionierungen, $\delta^{13}\text{C}$ -Werte jedoch als Ungleichgewichts-Fraktionierungen angenommen. Auffällig sind dabei parallele Schwankungen von $\delta^{18}\text{O}$ und $\delta^{13}\text{C}$.

Vent-Charakteristika

An mehreren ausgewählten Organismen der Vent-Gebiete vor Peru und Oregon wurden systematische Analysen stabiler Isotope durchgeführt. Ziel der Untersuchung war, Venting-Signale in den Isotopen-Signaturen zu erkennen (Tab. 7).

Die $\delta^{13}\text{C}$ -Signaturen der Schalen streuen in einem Bereich von 9‰ PDB (-7 bis $+2$), die $\delta^{18}\text{O}$ -Daten nur um ca. $2,5\text{‰}$ PDB ($2,0$ - $4,5$). Extreme $\delta^{13}\text{C}$ -Werte weisen Krustenbildungen auf. Werte bis $-66,7\text{‰}$ PDB bestätigen eine biogene Herkunft des Methans, das die Kohlenstoff-Quelle bildet.

Maßgeblich für die Beeinflussung von Isotopensignalen an Vent-Gebieten ist die Quelle für geochemische Komponenten. Während sie normalerweise oberhalb des Lebensraumes eines Organismus liegt (oberflächennahe Wassermassen, die durch Saisonalität gekennzeichnet sind und in denen Primärproduktion stattfindet), liegt sie hier unterhalb des Lebensraumes im Sediment (Vent-Fluide). Aus Langzeitversuchen ist bekannt, daß in den Vent-Gebieten nur minimale Temperaturschwankungen auftreten. Vor Oregon liegen sie zwischen $1,85^\circ$ und $1,9^\circ\text{C}$ am Marginal Ridge (ca. 2050 m Wassertiefe) und bei $4,4^\circ$ - $4,8^\circ\text{C}$ am Bioherm (690 m). Im Chiclayo-Canyon vor Peru schwanken die Temperaturen

zwischen 1,62° und 1,68°C (3715 m). Beobachtete Schwankungen der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte implizieren jedoch Schwankungen um bis zu 4°C.

			$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^{13}\text{C}$	
OREGON					
Marginal Ridge					
1428	<i>Calypptogena</i>	A	4,0 - 4,4	-0,37 - -1,1	*
		I	2,0 - 4,0	-6,8 - 0,2	*
2656	<i>Calypptogena</i>	A	0,8 - 3,8	-1,1 - 1,1	*
2046	<i>Calypptogena</i>	A	2,4 - 4,1	-1,2 - 1,2	*
		I	2,7 - 3,8	-1,1 - 0,4	*
1432	<i>Solemya</i>	A	3,6 - 4,2	0,5-2,1	1
1907	<i>Solemya</i>	A	4,0 - 4,5	0,9 - 2,0	*
1428	Kruste		2,8 - 8,3	-34,9 - -66,7	2
1428	Kruste		3,7 - 4,7	-51,2 - -66,7	1
Nähe 1428	Kruste		6,0 - 6,8	-34,9 - -39,1	1
Bioherm					
2283	<i>Calypptogena</i>	A	2,3 - 4,0	-3,0 - 0,7	*
PERU					
Chiclayo					
33	<i>Calypptogena</i>	A	3,0 - 3,7	-1,7 - 0,1	*
33	Serpulide		3,4 - 3,7	-7,9 - -2,4	*
Paíta					
30	Serpulide		3,4 - 3,6	-5,8 - -3,6	*
Chimbote					
8506	<i>Calypptogena</i>	I	2,5 - 3,9	-3,7 - 0,1	*
163	<i>Solemya</i>	A	3,2 - 4,1	-0,8 - 3,3	*
163	Serpulide		3,5 - 3,7	-6,8 - -4,3	*

Tab. 7 Signale stabiler Isotopen in carbonatischem Vent-Material. 1- Kulm et al. 1986, 2-Ritger et al. 1987, *-diese Arbeit

Darüber hinaus sind zyklische Schwankungen vorhanden, die exakt dem Muster in klimatisch beeinflussten Organismenschalen folgen.

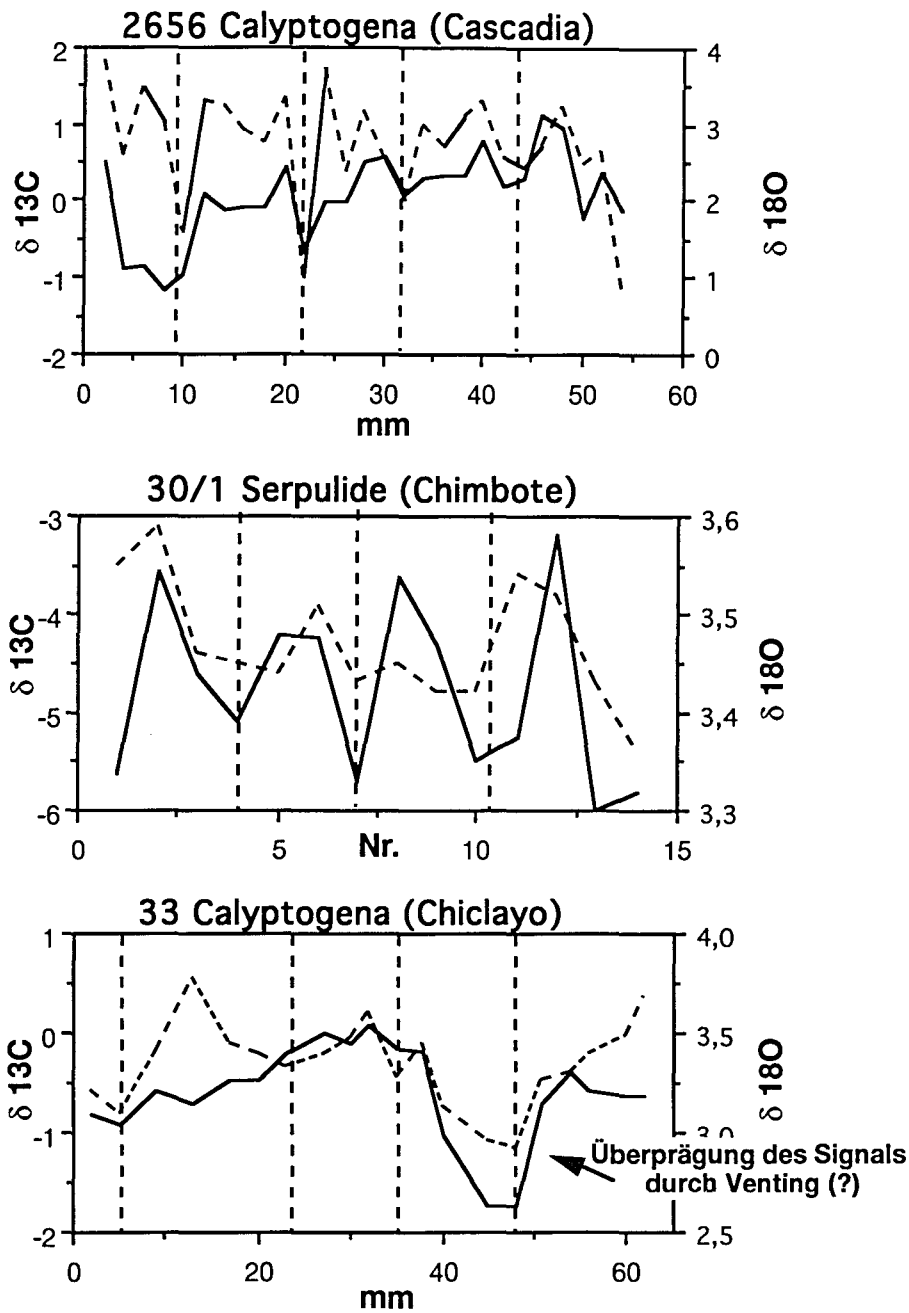


Abb. 20 Zyklische Schwankungen von $\delta^{18}\text{O}$

Das Wachstum der chemosynthetisch lebenden Organismen in Vent-Gebieten unterscheidet sich offenbar nicht von dem in anderen Gebieten. Es erfolgt kontinuierlich und ist nicht durch unregelmäßige Phasen gekennzeichnet. $\delta^{13}\text{C}$ -Signaturen folgen in den meisten Fällen denen von $\delta^{18}\text{O}$. Wenn die ablaufenden Prozesse hier die gleichen sind wie in anderen Gebieten, die sie erzeugenden Faktoren jedoch fehlen, müssen andere kausale Zusammenhänge vorliegen. Diese Erkenntnis ist sehr wichtig für die Beurteilung der in den Hartteilen gespeicherten Spurenelement-Verteilungsmuster. Bei sporadischem Wachstum wäre die Aufzeichnung lückenhaft.

Aus biologischer Sicht bietet sich die Erklärung durch eine "innere Dynamik" an. Das heißt, ein innerer Rhythmus ist jedem Individuum immanent, unabhängig von den äußeren Bedingungen. Er kommt gerade dann zur Geltung, wenn äußere Bedingungen konstant bleiben. Auf diese Weise erfolgt das Wachstum nach einem gängigen Muster, wobei die Zeitspanne, die einen Zyklus umfaßt, unbekannt ist. Die Ausprägung der Isotopensignale reflektiert Veränderungen der natürlichen Körperfunktionen und nicht die Veränderungen der Umwelt! Im Zusammenhang mit tektonischen Prozessen ist daher davon auszugehen, daß die Entwässerung an jedem Ort an dem sich eine Biozönose etabliert hat, über die gesamte Lebenszeit der Organismen anhält und damit konstante Nahrungszufuhr gewährleistet wird. Phasen erhöhten Ausstroms, die durch Spurenelementprofile bewiesen werden, beeinflussen nicht die Grundfunktionen, führen aber, aufgrund physikalischer Zwänge, zur geochemischen Veränderung der Hartteile. Daher sind Spurenelementprofile keiner Zyklizität unterworfen.

Bei 33 *Calyptogena* (Abb. 20) ist ein vorübergehender starker Abfall der Signale von $\delta^{18}\text{O}$ und $\delta^{13}\text{C}$ zu erkennen. Dieser markiert nicht das juvenile Stadium des Organismus, da der ältere Schalenabschnitt höhere Werte aufweist. Es ist daher möglich, daß in Extremfällen bei besonders starkem Venting eine Überprägung des zyklischen Musters stattfinden kann. Dieses ist jedoch das einzige Profil in dem eine derartige Überprägung beobachtet wurde.

Solemya und *Calyptogena* weisen unterschiedliche generelle Muster über ihre Schalenprofile auf. Bei *Calyptogena* ist grundsätzlich eine starke ontogenetische Überprägung des Isotopensignals vorhanden. Nach einem leichten Abfall der $\delta^{13}\text{C}$ -Werte kommt es zu einem Anstieg, d.h. es werden mehr schwerere Isotope eingebaut. Anschließend pendelt der Wert sich auf einem höheren Niveau ein (Abb. 20). Dieser Trend läßt sich sowohl in der Außen- als auch in der Innenschale eines Organismus nachvollziehen.

Alle untersuchten Isotopenprofile von *Solemya* weisen abfallende Isotopenwerte am äußeren Schalenrand auf (Abb. 22). Dies könnte ein Hinweis auf Schwankungen in der Reproduktionsfähigkeit der Organismen sein. Literaturdaten bzgl. stabiler Isotopen in *Solemya*-Schalen sind nicht bekannt, daher ist keine Vergleichsgrundlage vorhanden.

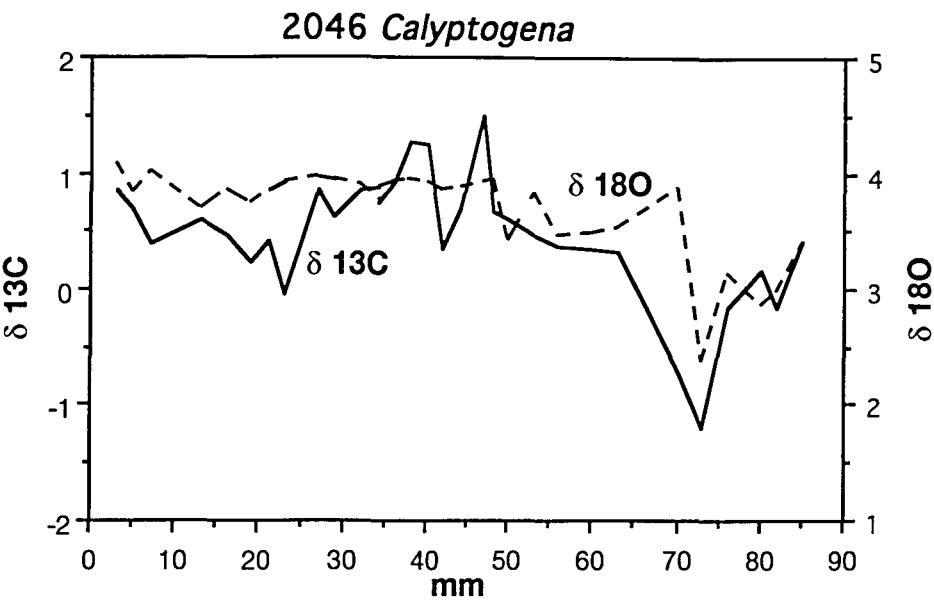


Abb. 21 Typisches Schalenprofil stabiler Isotopen bei *Calyptogena*

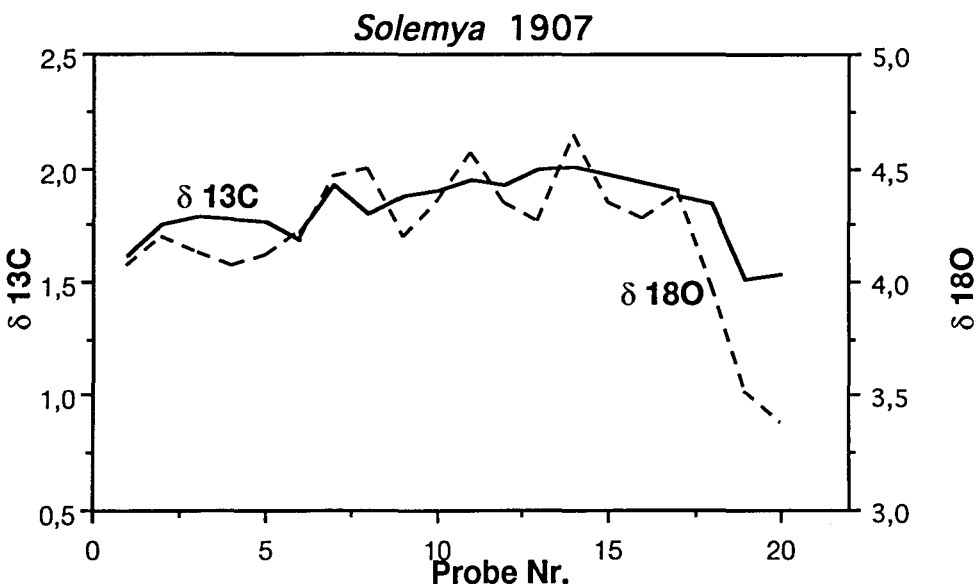


Abb. 22 Typisches Schalenprofil stabiler Isotopen bei *Solemya*

Nach BERG (1985) erreichen Muscheln von hydrothermalen Vent-Gebieten bei einer Schalengröße von ca. 40% einer ausgewachsenen Schale die Geschlechtsreife. Offensichtlich wird dieser Punkt in der Schalensignatur stabiler Isotope nachvollzogen. Die individuelle Wachstumsrate der Organismen ist jedoch für jedes Vent-Gebiet einzeln zu bestimmen. Über ein Isotopensignal, das durch das Ende der Reproduktivität eines Organismus erzeugt wird, liegen bisher keine Untersuchungen vor.

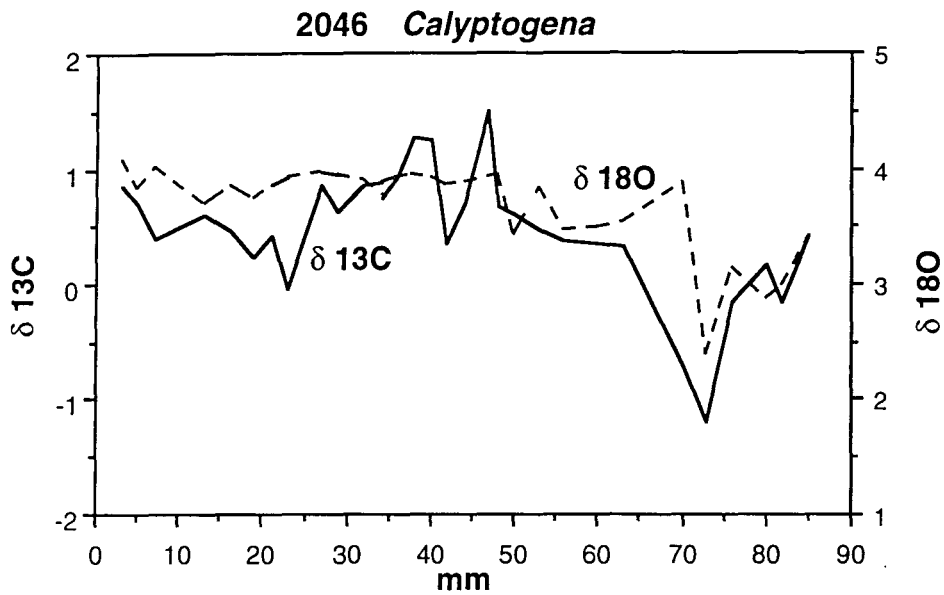


Abb. 21 Typisches Schalenprofil stabiler Isotopen bei *Calypptogena*

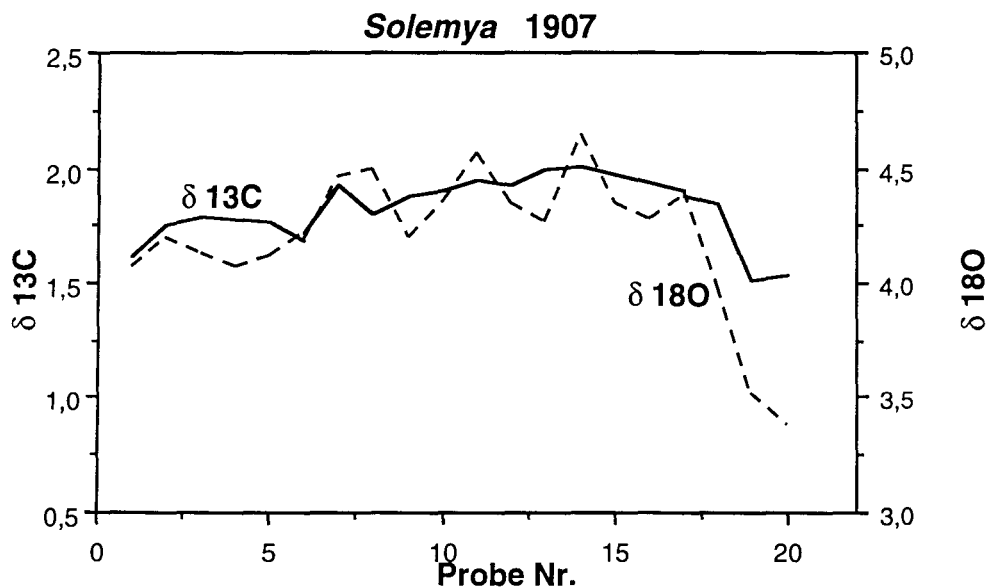


Abb. 22 Typisches Schalenprofil stabiler Isotopen bei *Solemya*

Nach BERG (1985) erreichen Muscheln von hydrothermalen Vent-Gebieten bei einer Schalengröße von ca. 40% einer ausgewachsenen Schale die Geschlechtsreife. Offensichtlich wird dieser Punkt in der Schalensignatur stabiler Isotope nachvollzogen. Die individuelle Wachstumsrate der Organismen ist jedoch für jedes Vent-Gebiet einzeln zu bestimmen. Über ein Isotopensignal, das durch das Ende der Reproduktivität eines Organismus erzeugt wird, liegen bisher keine Untersuchungen vor.

In Serpulidenröhren wurden parallele zyklische Schwankungen von $\delta^{18}\text{O}$ und $\delta^{13}\text{C}$ festgestellt (Abb. 20+23). Die Anreicherung des leichteren Kohlenstoffisotops (^{12}C) ist stärker ausgeprägt als in den Molluskenschalen. $\delta^{13}\text{C}$ -Werte schwanken im Bereich von -2,5 bis -8‰! Es ist daher von einer effizienteren Nutzung des austretenden isotopisch leichten Methans und des daraus, nach Oxidation, resultierenden Carbonates auszugehen als bei den Mollusken.

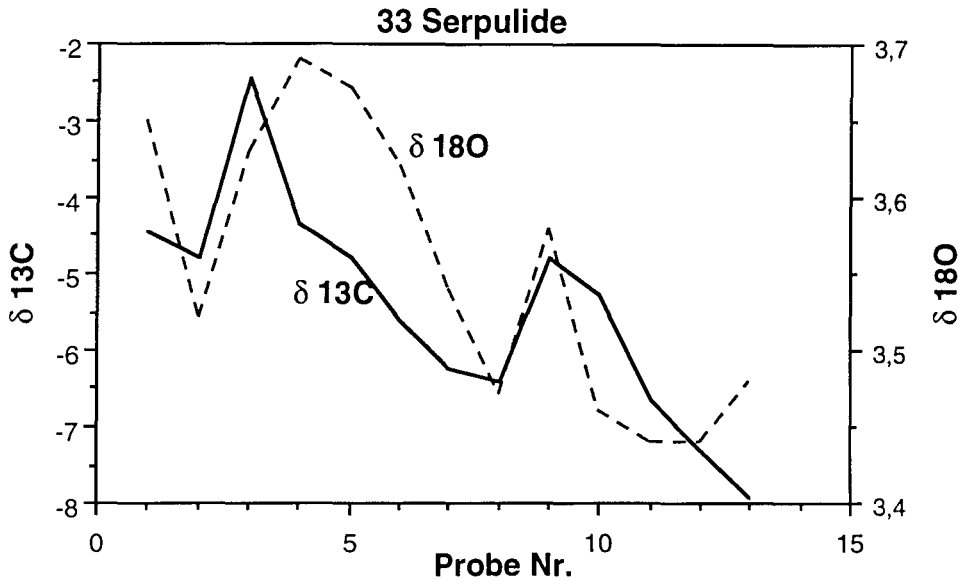


Abb. 23 Typisches Schalenprofil stabiler Isotopen eines Röhrenabschnittes von Serpuliden

Isotopensignaturen und Spurenelement-Verteilungsmuster in Hartteilen von Vent-Organismen reflektieren unterschiedliche parallele Prozesse (kontinuierlich/sporadisch) im Vent-Geschehen.

Als generelle Vent-Charakteristika kann gelten, daß (a) $\delta^{18}\text{O}$ -Schwankungen kein Maß für Temperaturschwankungen sind und (b) zyklische Schwankungen in den Verteilungsmustern stabiler Isotope keiner bekannten Zyklizität in den Umweltbedingungen entsprechen. Bei jeder Bewertung von Schalen-/Röhrenprofilen sind ontogenetische Effekte zu beachten, die unabhängig vom Lebensraum des Organismus sind.

Organische Weichteile und Röhren von Organismen aus Vent-Gebieten dokumentieren ebenso wie Krustenbildungen die biogene Herkunft des Methans, das ihnen als Nahrungsgrundlage dient, anhand ihrer $\delta^{13}\text{C}$ -Signaturen (Tab. 8). $\delta^{13}\text{C}$ -Werte bis -78‰

des Methanaustritts. Im Bereich der Cascadia-Subduktionszone gilt Lithium als diagnostischer Parameter für vulkanogene Sedimente. Ausgehend von der Annahme, daß ausströmende Wässer gelöste chemische Komponenten an die Sedimentoberfläche befördern, muß eine Anreicherung dieser Komponenten in Zeitserien aus einem geschlossenen System deutlich werden. Am Beispiel von Li im Vergleich mit CH_4 kann der Ausstrom verschiedener Komponenten und damit der Vent-Fluide bewiesen werden (Abb. 24).

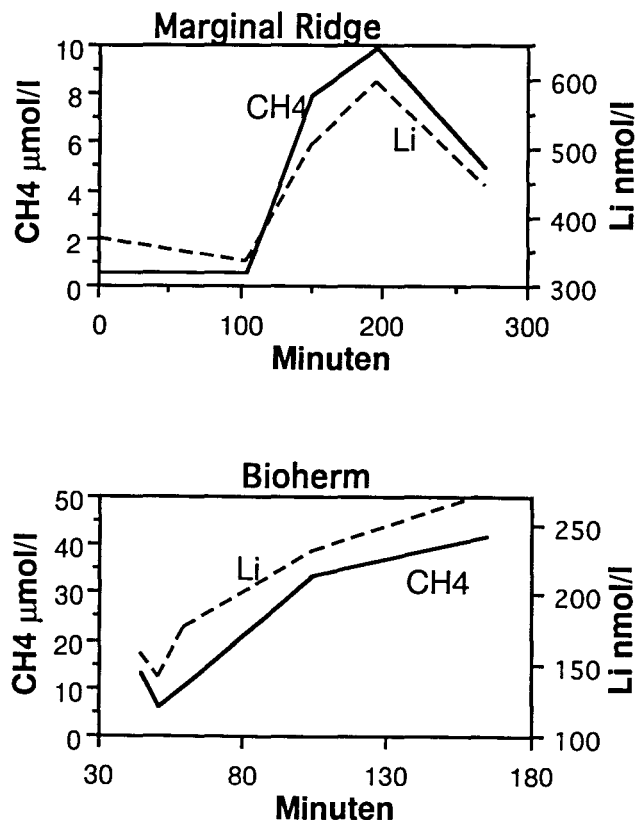


Abb. 24 Gemeinsamer Ausstrom von CH_4 und Li in Vent-Fluiden aus Probenkammermessungen, Oregon

Untersuchungen in der Wassersäule im Bereich der Vent-Gebiete vor Oregon ergaben Li-Gehalte von 167-258 nmol/l . Bodenwasser im Bereich des Marginal Ridge lag bei 370 nmol/l , im Bioherm bei 150 nmol/l . Diese Daten sind in identischer Weise erhoben worden und daher direkt miteinander vergleichbar. Sie unterstreichen die Annahme, daß Li Bestandteil der Vent-Fluide ist. Li-Konzentrationen im Meerwasser werden allgemein mit ca. 25 $\mu\text{mol/l}$ (BRULAND 1983) angegeben. Dieser Wert liegt eine Größenordnung über den Meßwerten. Weitere systematische Untersuchungen sind notwendig, um die Diskrepanz aufzuklären. Es ist möglich, daß analytische Probleme dafür verantwortlich

des Methanaustritts. Im Bereich der Cascadia-Subduktionszone gilt Lithium als diagnostischer Parameter für vulkanogene Sedimente. Ausgehend von der Annahme, daß ausströmende Wässer gelöste chemische Komponenten an die Sedimentoberfläche befördern, muß eine Anreicherung dieser Komponenten in Zeitserien aus einem geschlossenen System deutlich werden. Am Beispiel von Li im Vergleich mit CH₄ kann der Ausstrom verschiedener Komponenten und damit der Vent-Fluide bewiesen werden (Abb. 24).

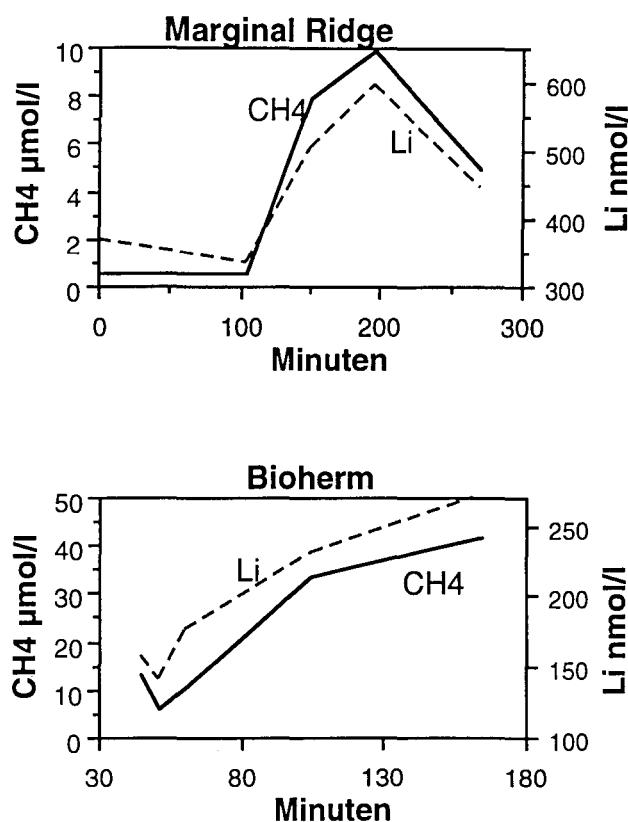


Abb. 24 Gemeinsamer Ausstrom von CH₄ und Li in Vent-Fluiden aus Probenkammermessungen, Oregon

Untersuchungen in der Wassersäule im Bereich der Vent-Gebiete vor Oregon ergaben Li-Gehalte von 167-258 nmol/l. Bodenwasser im Bereich des Marginal Ridge lag bei 370 nmol/l, im Bioherm bei 150 nmol/l. Diese Daten sind in identischer Weise erhoben worden und daher direkt miteinander vergleichbar. Sie unterstreichen die Annahme, daß Li Bestandteil der Vent-Fluide ist. Li-Konzentrationen im Meerwasser werden allgemein mit ca. 25 µmol/l (BRULAND 1983) angegeben. Dieser Wert liegt eine Größenordnung über den Meßwerten. Weitere systematische Untersuchungen sind notwendig, um die Diskrepanz aufzuklären. Es ist möglich, daß analytische Probleme dafür verantwortlich

sind. In dem beschriebenen Zusammenhang werden die Daten verwendet, da sie alle untereinander vergleichbar sind.

In der Cascadia-Subduktionszone werden Strömungsmuster der Fluide durch Störungssysteme oder stratigraphisch bedingte Zonen hoher Permeabilität kontrolliert und kanalisiert (MOORE ET AL. 1990, 1991). Die Untersuchungen belegen, daß Fluide vorzugsweise an tektonisch vorgezeichneten Stellen austreten, wie die Besiedelung von Organismen verdeutlicht. Zwischen den besiedelten Gebieten ist offenbar keine Nahrungsgrundlage für die Organismen vorhanden. Sollten auch hier Fluide austreten, müßten die Strömungsraten um Größenordnungen kleiner sein. Ausstromraten wurden durch *in situ*-Messungen und Berechnungen aus Methan-Anreicherungen in einem geschlossenen System ermittelt (Tab. 9).

	CH₄ [nmol/m ² d]	Gesamt [l/m ² d]	
Bioherm	118	1765	LINKE ET AL. 1994
Site 1900	10,3	98-490	CARSON ET AL. 1990
Site 1428		188	CARSON ET AL. 1990
Paita		441-970	LINKE ET AL. 1994/ TORRES ET AL. 1992

Tab. 9 Ausstromraten aus *in situ* Messungen

Charakteristisch für die Vent-Fluide vor Peru und Oregon sind sehr ähnliche $\delta^{18}\text{O}$ -Isotopensignaturen des Bodenwassers, die in Zeitreihen ermittelt wurden (Tab. 10). Sie liegen durchgängig im Bereich von -0,1 bis -0,3‰ PDB (Bioherm bis -0,6). Beim Aufbau der Hartteile von Organismen in Vent-Gebieten findet also eine starke Fraktionierung zugunsten des schwereren Sauerstoff-Isotops statt.

Untersuchungen an dem versiegelten ODP-Bohrloch 892 im Bereich der Cascadia-Subduktionszone deuten auf eine Methansättigung oberflächennahen Wassers hin (SCHLÜTER & LINKE 1993). Im Falle einer CH₄-Sättigung des ausströmenden Wassers kann also die CH₄-Verfügbarkeit für Organismen als direktes Maß für Fluid-Austritt angenommen werden.

		$\delta^{18}\text{O}$
OREGON		
Marginal Ridge	2046	-0,2
	2049	-0,1 - -0,3
	2659	-0,1 - -0,2
Bioherm	2283	-0,3 - -0,6
Wassersäule		-0,2 - -0,3
PERU		
Païta	168	-0,1 - -0,2
	180	-0,1 - -0,2
Chimbote	163	-0,2 - -0,3

Tab. 10 $\delta^{18}\text{O}$ -Signaturen der Vent-Fluide vor Peru und Oregon

Da Vent-Fluide beim Austritt sofort mit Meerwasser vermischt werden, ist ihr Chemismus schwer zu ermitteln. Er kann sich vom Porenwasserchemismus in der Umgebung der Vent-Biozönosen unterscheiden, wenn der Fluidtransport kanalisiert entlang tektonischer Schwachstellen erfolgt. Anhand oberflächennaher Erscheinungen sind jedoch generelle Aussagen möglich:

Cascadia-Subduktionszone

An allen Vent-Sites in der Cascadia-Subduktionszone wurden authigene Carbonatbildungen beobachtet. Geringe $\delta^{13}\text{C}$ -Werte deuten auf biogenes Methan aus oberflächennahen (<750m) Sedimenten hin (RITGER ET AL. 1987). Innerhalb des Marginal Ridge sind zwei Fluid-Systeme auszugrenzen, wobei sich das erste (Bioherm) durch geringe Li-Konzentrationen und hohe Zn-Konzentrationen auszeichnet, während das zweite (1428/1900) mittlere Konzentrationen der untersuchten Spurenelemente aufweist und z.T. extreme Ba-Anreicherungen in Krustenbildungen und Schalen produziert.

Peru-Kontinentalhang

An der Konvergenzzone vor Peru sind zwei Fluidsysteme bekannt, die durch ihre Cl^- -Konzentrationen unterschieden werden können (MARTIN ET AL. 1993). Bedingt durch die größere Wassertiefe der Vent-Gebiete (3500-4700 m), sind vor Peru keine Carbonatkrusten vorhanden, obwohl ein ausreichendes Angebot zur Verfügung stände. Während Mollusken sich durch ihr Periostrakum vor Korrosion schützen, sind Krustenbildungen als anorganische Präzipitate dem Angriff des Meerwassers schutzlos ausgesetzt.

Die Ausprägung der Upwelling-Phänomene steht in einem Verhältnis von 1 (Oregon) : 3 (Peru) (KRISSEK & SCHEIDEGGER 1983). Dieses Verhältnis spiegelt sich auch in unterschiedlichen Konzentrationsbereichen von Spurenelementen wider. Für eine Abschätzung der Einflußgröße des Venting an "cold seeps" wie vor Peru und Oregon, ist es daher notwendig, das Potential an Spurenelementen von Vent-Fluiden zu bestimmen. Dabei muß hydrologischen und Sedimentationsbedingungen Rechnung getragen werden.

Peru

Vor Peru ist Barium das dominierende Element. Hohe Konzentrationen in den Carbonaten gehen einher mit Baryt-Präzipitaten in der Umgebung (DIA ET AL. 1993, TORRES ET AL. 1994). Die Dominanz von Barium gegenüber anderen Spurenelementen wurde in Kap. 3.3 ausgeführt. Extreme Konzentrationen in Serpulidenröhren (Abb. 13) weisen auf hohe Konzentrationen in Vent-Fluiden hin. Da Barium in großen Mengen in Upwelling-Sedimenten vorkommt, müssen die austretenden Fluide diesen entstammen. Die Herkunft der Fluide aus dem Akkretionskeil wird damit belegt. Für eine Herkunft aus dem oberen Mantel liegen keine Anhaltspunkte vor.

Spurenelementsignaturen der Hartteile von Organismen unterscheiden sich hinsichtlich der Konzentrationsbereiche nicht wesentlich voneinander (Tab. 3). Sie repräsentieren daher vermutlich ein einheitliches Fluid-System, das aufgrund der Spurenelemente nicht differenziert werden kann.

Oregon

Vom Upwelling geprägte Sedimentpakete bilden auch vor Oregon die Quelle für Vent-Fluide. Sowohl Spurenelementverteilungen als auch Isotopensignaturen deuten darauf hin. Ausströmende Fluide sind nicht einheitlich; zwei unterschiedliche Signaturen wurden festgestellt. Sie werden repräsentiert durch die Lokalitäten Bioherm und Marginal Ridge. Ein ausführlicher regionaler Vergleich wird in Kap. 4 durchgeführt. Unterschiedliche geochemische Charakteristika der Fluide resultieren entweder aus unterschiedlichen Quellen innerhalb des Sediments (verschiedene geochemische Provinzen) oder aus nachträglicher Überprägung, z.B. durch Meerwasser-Recharge-Zonen.

In beiden Arbeitsgebieten entsprechen die ausströmenden Fluide der Bodenwassertemperatur, und es gibt keine Hinweise auf thermale Einwirkungen.

4 Regionaler Vergleich geochemischer Daten

Im Rahmen der vorangegangenen Abschnitte dieses Kapitels wurden geochemische Charakteristika einzelner Vent-Sites ermittelt sowie eine Grundlage für die Diskussion der Daten vorgestellt. Die Vielfalt der Untersuchungen führte dabei nicht zu einheitlichen Ergebnissen. Vielmehr wurde deutlich, daß eine globale Interpretation nur aufgrund detaillierter Einzelergebnisse erfolgen kann. Die Resultate einzelner Vent-Sites können nun, als Gruppen zusammengefaßt, miteinander verglichen werden, um darauf aufbauend die Gesamterscheinungen des Fluid-Venting vor Peru und vor Oregon zu beurteilen.

4.1 Marginal Ridge

Am Marginal Ridge vor Oregon wurden bei der zweiten Tauchkampagne 1993 zwei Vent-Biozönosen in unmittelbarer Umgebung von Site 1428 entdeckt. Die drei Gebiete bilden ein Hangprofil, zeigen jedoch keinerlei offenkundige Verbindung zueinander (Abb. 5).

Aus allen drei Gebieten wurden innerhalb von drei Tagen auf zwei verschiedenen Tauchgängen Proben (lebende *Calyptogena*) geborgen. Geochemische Charakteristika der Schalen sind also vom Außenrand ausgehend direkt miteinander vergleichbar.

Ein Vergleich des Elements Cu zeigt korrelierbare Verteilungsmuster in hangabwärts abnehmenden Konzentrationsbereichen (Abb. 25). Das parallele Auftreten charakteristischer Signale weist darauf hin, daß die erzeugenden Impulse an allen drei nicht zusammenhängenden Lokationen auftraten. Das ist möglich durch den Anschluß an dasselbe Fluid-System. Die unterschiedlichen Konzentrationen in den Schalen können einen Hinweis auf die Quantität austretender Fluide geben. Danach wäre der Fluid-Ausstoß bei Site 1428(2656) > 2658-2 > 2658-1. Da jedes Schalenprofil jedoch auch die individuelle Kennzeichnung eines Organismus trägt, könnten auch natürliche biologische Variabilitäten die Ursache sein. CH₄-Messungen im Porenwasser zeigen höchste Konzentrationen bei 2658-1. Die Messungen stellen eine Momentaufnahme dar und können nicht auf langfristige Entwicklungen interpoliert werden. Wichtig ist, daß an allen drei Lokationen eine Übersättigung von CH₄ festgestellt wurde und mithin freies Gas als Quelle für die Organismen zur Verfügung steht (SCHLÜTER & LINKE 1993).

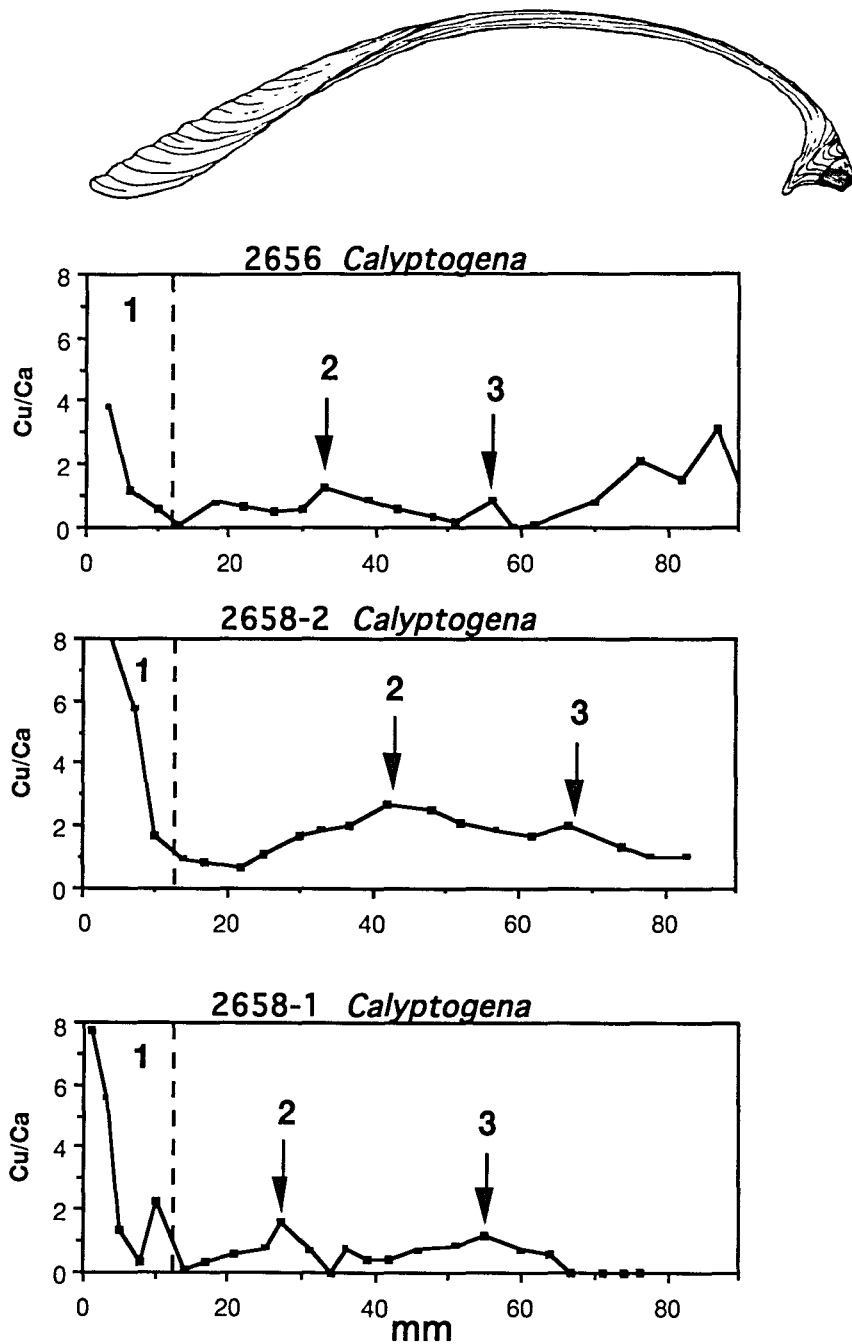


Abb. 25 Regionaler Vergleich von Cu-Konzentrationen in *Calyptogena*-Schalen; Pfeile geben eine Korrelationsmöglichkeit an

Bei Site 2658-1+2 wurde eine starke Anbindung der Organismen an eine tektonische Lineation beobachtet. Lebensspuren außerhalb dieses schmalen Streifens waren nicht vorhanden. Im Gegensatz dazu sind die Organismen bei Site 1428 über ein größeres Areal "verstreut", innerhalb dessen sie sich auch bewegen. Diese Tatsachen lassen darauf schließen, daß die Nahrungszufuhr bei 2658-1+2 in höherem Maße limitiert ist als bei 1428. Die Organismen formieren sich nur direkt am Fluidaustritt, wenn außerhalb das

Angebot zu spärlich ist. Bei 1428 könnte ein erhöhter Fluidaustritt einen "plume" über einem größeren Bereich bilden, der eine Nahrungsgrundlage auch in geringer Entfernung von der Austrittsstelle garantiert.

4.2 Marginal Ridge/Bioherm (Second Ridge)

Die Lokation Bioherm zeichnet sich durch extreme und massige Ausbildung authigener Carbonate aus. Am Marginal Ridge sind demgegenüber geringmächtige Krusten (einige Zentimeter), seltener einzelne Blöcke, zu beobachten. Messungen in beiden Gebieten belegen ein Verhältnis des Ausstroms von Vent-Fluiden von 1 (Marginal Ridge) zu 10 (Bioherm) (LINKE ET AL. 1994). Wenn die Ausstromrate an einer gegebenen Lokation ein direktes Maß für die Verfügbarkeit und damit den Einbau von Spurenelementen in biogene Hartteile ist, wäre auch hier ein Verhältnis von 1:10 zwischen den beiden Gebieten zu erwarten. Dieses ist jedoch nicht beobachtet worden.

Im Vergleich zwischen den Vent-Sites am Marginal Ridge und im Bioherm signalisieren geochemische Charakteristika vielmehr grundlegende Unterschiede zwischen beiden Gebieten. Auffällig sind vor allem die geringen Li-Konzentrationen in den Molluskenschalen des Bioherm. Sie liegen durchgängig im Bereich der analytischen Nachweisgrenze und können daher nicht erfaßt werden. Am Marginal Ridge ist Li hingegen durchgängig in hohen Konzentrationen vorhanden. Ba und Cu sind am Bioherm ebenfalls gering konzentriert. Lediglich Zn tritt in höheren Konzentrationen in Organismen aus beiden Gebieten auf. Die Gesamtheit der untersuchten Spurenelemente ergibt zudem ein eher uneinheitliches Bild (Abb. 26). Offensichtlich sind hier die die Spurenelementverteilungen in Molluskenschalen prägenden Prozesse andere als am Marginal Ridge.

Aus ODP-Bohrungen ist bekannt, daß im Bereich der Lokation Bioherm eine Gashydratschicht bis in eine Tiefe von 68 mbsf (WESTBROOK ET AL. 1994) ausgebildet ist. Im Bereich des Marginal Ridge ist diese Schicht nicht mehr nachweisbar. Das als Clathrat gebundene Methan ist als Quelle für die mächtigen Carbonate im Bioherm anzunehmen.

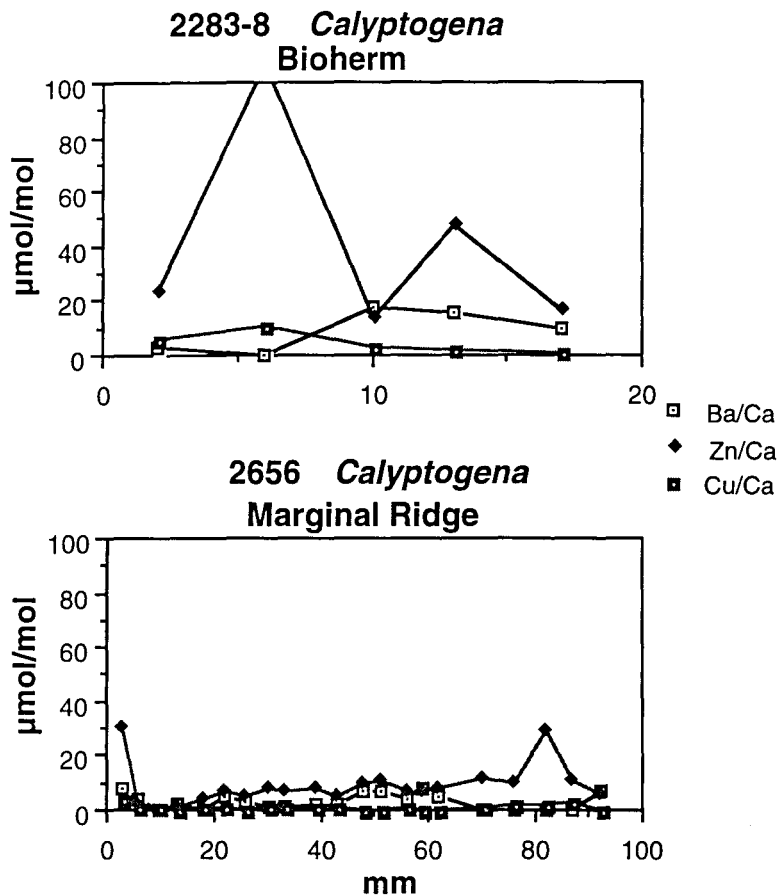


Abb. 26 Vergleich von *Calyptogena*-Schalenprofilen Bioherm/Marginal Ridge

Die größten Massenbewegungen finden hier also in einem Bereich von wenigen Zehnermetern ober- und unterhalb der Sedimentoberfläche statt und werden wahrscheinlich von einem Fluid-System angetrieben, das von dem am Marginal Ridge unabhängig ist. Die geringen Elementkonzentrationen in diesem Gebiet mit extrem hohen Ausstromraten können ein Indiz dafür sein, daß hier eine oberflächennahe Zirkulation stattfindet. Entsprechend wären die austretenden Fluide nicht in besonderem Maße mit Spurenelementen angereichert, da sie die mächtigen Schichtpakete der vom Upwelling geochemisch geprägten Sedimente nicht durchströmen. Lediglich Methan wird in großen Mengen in der Gashydratschicht gelöst, mitgeführt und nach Oxidation an der Oberfläche in Form von Carbonaten wieder ausgefällt.

Eine weitere Besonderheit am Bioherm ist das Auftreten von Schwefelwasserstoff. Auch H_2S kann Clathrate bilden (KVENVOLDEN & KASTNER 1986) und ist damit vermutlich ebenfalls Bestandteil der Gashydratschicht.

4.3 Chiclayo/Paita/Chimbote

Die Untersuchungsgebiete vor Peru zeigen von den geochemischen Parametern her ein relativ einheitliches Bild. Charakteristisch ist die Dominanz von Ba über Li (Abb. 15). Zn wurde stets in größeren Mengen eingebaut als Cu. Diese Tatsache ist nicht nur bei *Calyptogena* und *Solemya*, sondern auch bei Serpuliden zu beobachten.

Da viele Proben aus dem Arbeitsgebiet vor Peru gedredgt wurden, sind Details der Umgebung der jeweiligen Biozönose nicht bekannt.

Gedredgte ölhaltige Gesteine aus dem Arbeitsgebiet vor Chimbote deuten auf Kohlenwasserstoffe im Untergrund hin. Unter Umständen bilden diese hier die Quelle des Venting. Dies ist jedoch an geochemischen Charakteristika biogener Hartteile nicht nachvollziehbar.

4.4 Vergleich der Vent-Gebiete vor Peru und Oregon

Die Untersuchung der Mechanismen des Fluid-Venting ist von großer Bedeutung für die Abschätzung von Auswirkungen dieser Prozesse auf globale Stoffkreisläufe. Die Entdeckung reicher Faunengesellschaften in ansonsten kaum besiedeltem Tiefseegebiet ließ auf ähnliche Nahrungsquellen schließen wie an den Hot Vents der mittelozeanischen Rücken. Ein Vergleich der Vent-Gebiete vor Peru und Oregon ermöglicht eine überregionale Abschätzung der Variabilität dieser Systeme in voneinander unabhängigen Gebieten.

Mit Hilfe direkter Beobachtungen und biogeochemischer Arbeitsmethoden kann ein Vergleich in zwei Stufen durchgeführt werden:

- (1) Beobachtung der Zusammensetzung und Verbreitung der Organismengemeinschaften
=> Regionale Variabilität
- (2) Chemische Charakterisierung biogenen Probenmaterials
=> Lokale Variabilität

Im Vergleich unterschiedlicher Gebiete können Sensibilität und Beständigkeit der Systeme Hinweise auf Reaktionszeiten im Falle von Veränderungen geben.

Zusammensetzung und Verbreitung der Organismengesellschaften

Direkte Beobachtungen vor Peru und Oregon mittels Foto- und Videodokumentation und bei Tauchbooteinsätzen (*Nautile* und *Alvin*) ermöglichen eine Beschreibung der Lokalitäten, die hier tabellarisch dargestellt wird (Tab. 11):

	Peru	Oregon
Zusammensetzung der Vent-Biozönose	<i>Calypptogena</i> , <i>Solemya</i> , Serpuliden, Napfschnecken (Chiclayo)	<i>Calypptogena</i> , <i>Solemya</i> , <i>L. barhami</i> , Napfschnecken
Struktur der Biozönose	meist viele Organismen gleicher Größe => keine Gleichgewichtseinstellung; jung	sowohl "alte" Vent-Felder mit heterogener Alterstruktur als auch jüngere
Flächenhafte Ausdehnung	entlang Abrißkanten mit steiler Morphologie und geringer Sedimentbedeckung. Ausdehnung von Topographie begrenzt. Große Muschelfelder entlang ebener Streifen am Hang. Übergänge zwischen Feldern in Abhängigkeit von Topographie.	Auf Absätzen am Hang, die meist deutlich mehr Platz bieten als in Anspruch genommen wird. Aufreihung entlang von Linien (tektonische Lineation, Entwässerungsbahnen). Kein Übergang zwischen einzelnen Feldern
Präzipitate	Baryt	Carbonatkrusten
Gesamteindruck	Sehr individuenreiche Fauna in frisch etablierten Vent-Gemeinschaften.	Vent-Gemeinschaften in allen Stadien der Entwicklung. Vitale Muschelfelder stehen disartikulierten Schalenresten gegenüber.

Tab. 11 Gegenüberstellung der Vent-Gebiete vor Peru und Oregon

Generell sind die Vent-Gemeinschaften vor Peru größer, reicher und vitaler als vor Oregon. In einigen Gebieten wird jeder Fleck besiedelt, der die Möglichkeit dazu bietet. Es muß also davon ausgegangen werden, daß der Ausstrom von Vent-Fluiden flächenhaft stattfindet.

Vor Oregon sind die Vent-Gemeinschaften häufig entlang von Linien aufgereiht. Diese entsprechen wahrscheinlich dem Austritt tektonischer Lineationen und markieren damit den eng umgrenzten Austritt von Vent-Fluiden.

Chemische Charakterisierung des biogenen Probenmaterials

Wie oben dargestellt, reflektieren die Spurenelementkonzentrationen in Hartteilen von Organismen geochemische Charakteristika des Ablagerungsraumes, in dem die Organismen leben. Anreicherungen von Lithium in dem Material der Cascadia-Subduktionszone zeigen den Eintrag detritischen Materials aus den vulkanischen Cascaden an. Barium als Proxy-Parameter für Upwelling bildet die zweitgrößte Spurenelementfraktion. Bei allen Spurenelementen sind Basiskonzentrationen von

erhöhten Konzentrationen zu unterscheiden. Sie liegen vor Peru höher als vor Oregon. Die Konzentrationen zeigen die Verfügbarkeit der Elemente und damit der Vent-Fluide an.

Dieses Charakteristikum zeigt sich auch in dem Material vom Peru-Kontinentalhang. In Serpulidenröhren sind phasenweise ganz besonders extreme Anreicherungen von Spurenelementen zu beobachten (s.o.).

Generell sind die Spurenelementkonzentrationen in *Calypptogena*- und *Solemya*-Schalen des Peru-Arbeitsgebietes höher als Konzentrationen in dem Oregon-Material. Daraus ist abzuleiten, daß entweder die Vent-Fluide vor Peru höhere Konzentrationen an Spurenelementen aufweisen oder größere Mengen von Fluiden ausströmen. Da vor Peru das Upwelling-Phänomen stärker ausgeprägt ist (Typ-Lokalität) und gleichzeitig ein hoher Schwebstoffeintrag vom Kontinent fehlt, ist die erste Möglichkeit die wahrscheinlichere.

5. Zeitskala für Venting-Prozesse

Um eine Abschätzung der Wirksamkeit von Stoffumsätzen an Cold Seeps durchzuführen, ist es unbedingt notwendig, die Zeitskala für Venting-Prozesse zu kennen. Da das Phänomen an sich noch nicht sehr lange bekannt ist und jede Art von Meßkampagnen immer nur einen Ist-Zustand widerspiegeln kann, sind bisher nur grobe Schätzungen möglich. Charakteristische Biozönosen sind ein verlässlicher Anzeiger für anhaltenden Fluidaustritt, da Organismen auf das Versiegen ihrer Nahrungsquellen zwangsläufig sofort reagieren. Über den bisherigen Beobachtungs-Zeitraum der Vent-Gebiete vor Oregon (10 Jahre) ist, auf kleinem Raum, sowohl die Extinktion großer Muschelfelder als auch der unveränderte Fortbestand einzelner Biozönosen beobachtet worden. Daraus ergibt sich, daß die Lebensdauer einzelner Vent-Biozönosen z.T. kleiner als zehn Jahre ist, aber auch ein unveränderter Fortbestand einer Biozönose über mehrere Jahrzehnte möglich sein kann.

Vergleich von *Calymene*-Spurenelementprofilen

Die Wachstumsraten von *Calymene* an Cold Seeps sind nicht bekannt. Direkte Beobachtungen, d.h. *in situ* Markierungen o.ä., sind aufgrund des hohen technischen Aufwandes noch nicht durchgeführt worden. Eine Möglichkeit der indirekten Beobachtung besteht in der Korrelation von Spurenelementprofilen, sofern der genaue Startpunkt bekannt ist.

An einer ausgewählten Lokation vor Oregon (1428) wurden im Abstand von 9 Jahren lebende *Calymene* beprobt. Eine Korrelation wurde anhand des Elementes Kupfer durchgeführt (Abb. 27). Dabei ergeben sich Wachstumsraten von 2,1 bis 3,9 mm pro Jahr. Es ist bekannt, daß *Calymene*-Schalen in der ersten Lebensphase sehr schnell wachsen und in späteren Wachstumsphasen nur ein geringer Zuwachs erfolgt (ROUX ET AL. 1985). Die Korrelation der Schalenprofile von *Calymene* 1428 und 2656 beruht auf dem Vergleich eines "alten", d.h. in einer späten Lebensphase aufgebauten, Schalenabschnittes mit einem relativ jüngeren. Daher ist die ermittelte Differenz der Wachstumsraten durch biologische Prozesse zu erklären. Die Wachstumsraten liegen im Bereich der für *Calymene* an Hot Vents bekannten Raten (ROUX ET AL. 1985). Offenbar hat die Temperatur ausströmender Fluide keinen nennenswerten Einfluß auf das Wachstum von Vent-Organismen.

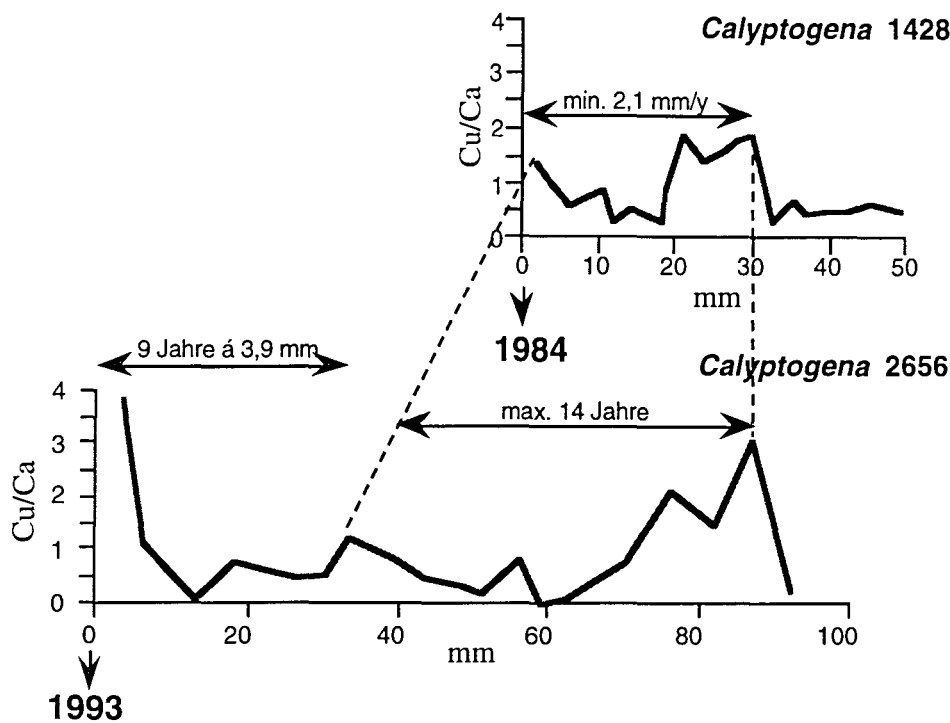


Abb. 27 Korrelation von Spurenelementprofilen, Site 1428, Marginal Ridge

Vergleich von *Calyptogena* und *L. barhami*

Der Vergleich eines Schalenprofils von *Calyptogena* mit einem Röhrenprofil von *L. barhami* (hier wurde Zn verwendet) hat gezeigt, daß Verteilungsmuster von Spurenelementen in unterschiedlichen Materialien korrelierbar sind (Abb. 28). Daraus kann eine relative Wachstumsrate von *L. barhami* gegenüber *Calyptogena* ermittelt werden. Sie ist hier um einen Faktor 5 höher als die von *Calyptogena*. Damit wäre das Alter der *L. barhami* Populationen an Site 1428 ca. 25x so hoch wie das beobachter *Calyptogena*-Populationen.

Diese Schätzung geht von einem linearen Wachstum beider Organismengruppen aus, das nicht der Realität entspricht. Für *Calyptogena* sind exponentielle Wachstumskurven bekannt (RHOADS ET AL. 1985). Eine daraus resultierende Korrektur ergibt daher ein geringeres Alter für *L. barhami*.

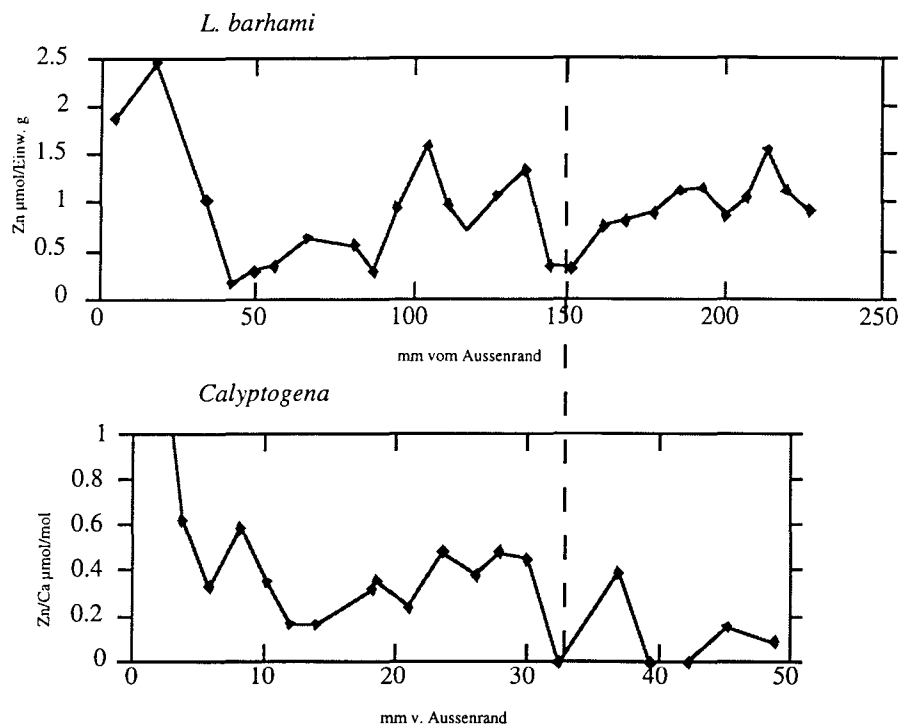


Abb. 28 Korrelation eines Schalenprofils von *Calyptogena* mit einem Röhrenprofil von *L. barhami* anhand von Zn-Gehalten

Die Korrelation von Schale und Röhre wurde an 1993 beprobten Organismen von Site 1900 (2663) erneut durchgeführt. Geringe Zn-Konzentrationen in der *Calyptogena*-Schale lassen jedoch keinen Vergleich des Gesamtprofils zu. Im jüngeren Teil zeigt sich aber auch hier eine gute Übereinstimmung, die Wachstumsraten im Verhältnis von ca. 1:2 von *Calyptogena* gegenüber *L. barhami* anzeigt. Das wahre Alter der ca. 1m langen Individuen von *L. barhami* wäre danach 5,5 mal so hoch wie das von *Calyptogena*. Dieser Vergleich unterstützt die Theorie von der Vergleichbarkeit unterschiedlicher Materialien, wird jedoch für weitere Detailbetrachtungen vernachlässigt.

Ausgehend von den einzigen bekannten Wachstumsraten von *L. barhami* unter optimalen Bedingungen von ca. 11cm/y (DANDO ET AL. 1992), wären die Populationen von *L. barhami* an Site 1428 anno 1984 etwa 11 Jahre alt gewesen. Diese Wachstumsrate wurde ermittelt anhand einer Population von *L. barhami*, die sich in einem Schiffswrack auf verfaulenden Lebensmitteln angesiedelt hat und mithin optimale Lebensbedingungen vorgefunden hat (CH_4 -Sättigung). Bei Annahme der halben Effizienz der austretenden Vent-Fluide in bezug auf CH_4 -Verfügbarkeit gegenüber verfaulenden Lebensmitteln ist das Alter auf 20-25 Jahre zu schätzen, das von *Calyptogena* auf ca. 8 Jahre unter Berücksichtigung des exponentiellen Wachstums.

Direkte Beobachtungen

Die Lokation Bioherm wurde 1990 erstmals beprobt. Obwohl die Organismendichte sehr groß war, waren die einzelnen Individuen eher klein, schätzungsweise 4-6 Jahre alt (s.o.). Bei der zweiten Tauchkampagne in dieses Gebiet, im Herbst 1993, waren lediglich große Felder disartikulierter Muschelschalen zu entdecken. Sehr vereinzelt befanden sich kleine vitale Biozönosen. Über den Zeitraum von drei Jahren hat sich also das Erscheinungsbild dieser Lokation vollständig geändert, und es muß entsprechend von einer Veränderung des hydrologischen Systems ausgegangen werden.

Im Gegensatz dazu wurde an der Lokation 1428 ein unveränderter Zustand über einen Zeitraum von 1984 bis 1993 registriert. 1428 wurde 1984 und 1993 besucht und beprobt. In allen Fällen wurde eine Organismengemeinschaft beobachtet, in der sowohl große Mengen lebender als auch toter Organismen vorhanden waren. Es herrscht hier also ein Gleichgewichtszustand, der darauf hinweist, daß die Biozönose auch beim ersten Besuch schon seit über 10 Jahren existierte (Abb. 29).

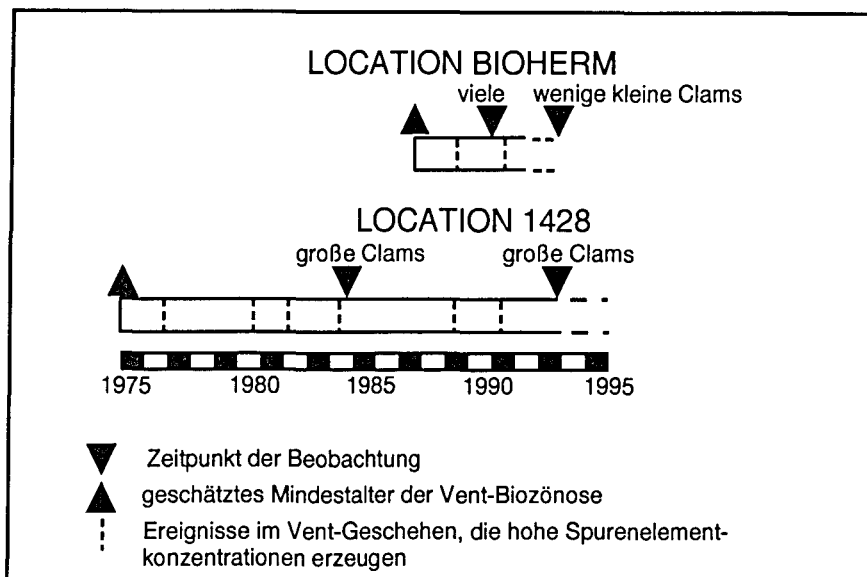


Abb. 29 Zeitskala für Venting-Prozesse vor Oregon

Aus den vorliegenden Untersuchungen und Beobachtungen kann daher der Zeitraum für anhaltende Venting-Prozesse vor Oregon mit ≤ 10 bis 10^2 Jahre angegeben werden.

Die Datierung und zeitliche Eingrenzung einzelner Vent-Ereignisse ist nur möglich, wenn Wachstumsraten von Organismen bekannt sind. Feinstrukturanalysen und

Isotopenuntersuchungen an *Calyptogena*- und *Solemya*-Schalen haben ergeben, daß die Mollusken in den untersuchten Gebieten ein kontinuierliches Wachstumsmuster aufweisen. Das heißt, daß, obwohl von Phasen verstärkten Ventings ausgegangen wird (s. Kap. 6), in dem Gesamtgeschehen eine Kontinuität gewahrt ist, die das Überleben der Organismen sichert. Entsprechend ist anzunehmen, daß ein CH₄-Austritt über den gesamten Zeitraum der Existenz einer Vent-Biozönose erfolgt.

Auf Grundlage eines kontinuierlichen Wachstums sind Einzelereignisse, die sich in der Anreicherung von Spurenelementen in Profilabschnitten der Schalen manifestieren, abzuschätzen. Anhand der Form von Peaks, die Venting-Ereignisse anzeigen und der Länge des davon beeinflussten Schalenabschnittes, sind Rückschlüsse über die Art der Ereignisse möglich. Aus Spurenelementdaten interpolierte Wachstumsraten betragen an einer ausgewählten Lokation vor Oregon 2,1-3,9 mm pro Jahr. Aus Anwendung unterschiedlicher Arbeitsmethoden wurde die größere Aktivität und Intensität des Venting vor Peru deutlich. Folglich sind auch die Wachstumsraten höher einzuschätzen. Der Vergleich von Spurenelementsignalen zeigt gut "definierte" Vent-Ereignisse an.

Bei Organismen aus der Cascadia-Subduktionszone sind die Signale über einen größeren Schalenabschnitt ausgeprägt und weniger hoch als vor Peru. Geht man davon aus, daß die Organismen zusätzlich langsamer wachsen, wird der Effekt noch deutlicher. Einzelereignisse haben daher vor Oregon eine Dauer von ca. einigen Monaten bis zu einem Jahr, während sie vor Peru wahrscheinlich im Zeitraum von Wochen stattfinden.

Für diese unterschiedliche Ausprägung des Venting bieten sich folgende Erklärungen an: (1) Vor Peru treten tektonische Bewegungen, die verstärkte Entwässerung zur Folge haben, als plötzliche Impulse von kurzer Dauer auf, während sie vor Oregon länger anhalten und allmählich einsetzen und abklingen. (2) Bedingt durch die mächtigere Sedimentdecke in der Cascadia-Subduktionszone pausen sich Impulse aus dem Untergrund langsamer durch und halten länger an als vor Peru. In diesem Fall ist die Aufzeichnung der Ereignisse vor Peru unmittelbarer; die Sedimentdecke würde vor Oregon eine Pufferung der Signale bewirken. In jedem Fall muß von Phasen verstärkten Ventings ausgegangen werden.

Durch den Nachweis einer Diskontinuität im Vent-Prozeß relativiert sich die Diskrepanz in der Abschätzung von Fluid-Volumina (s. Kap. 1), die aus dem Akkretionskeil ausströmen.

Über die Dauer der Venting-Prozesse im Cascadia-Akkretionskeil kann anhand der bisherigen Daten keine Aussagen gemacht werden. Am Nankai-Akkretionskeil wurden fossile Muschelschalen aus Carbonatzementen untersucht, die darauf hinweisen, daß Venting-Prozesse hier bereits seit mindestens 130.000 Jahren anhalten (LE PICHON et al.1992). Daraus ergibt sich ein Anhaltspunkt über prinzipielle Größenordnungen.

Aus dem Arbeitsgebiet Bioherm sind mächtige Carbonate mit einzementierten Muschelschalen bekannt. Sie könnten zukünftig Hinweise auf die bisherige Dauer der Venting-Prozesse im Cascadia-Akkretionskeil liefern.

6 Fluid-Venting: Kein kontinuierlicher Prozeß

Der Ausstrom von Fluiden aus Akkretionskeilen ist erwiesen, wenngleich über Herkunft der Fluide Uneinigkeit besteht. Zur Quantifizierung des Ausstroms wurden unterschiedliche Methoden angewandt. Die Resultate weichen z.T. um Dimensionen voneinander ab. In allen Fällen wurden dabei als Momentaufnahmen erzielte Werte über längere Zeiträume extrapoliert. Dieses Verfahren impliziert eine Kontinuität der Prozesse, obwohl allgemein angenommen wird, daß die Entwässerung, zumindest teilweise, in Schüben erfolgt, z.B. induziert durch Erdbeben (LE PICHON, öffentl. Vortrag, Kiel 1994). Es ist bekannt und nachgewiesen, daß Organismen an Austrittsstellen von Fluiden siedeln. Nach LE PICHON ist für das Überleben der Organismen ein minimaler Ausstrom notwendig. Davon ausgehend muß eine kontinuierliche Versorgung über den Zeitraum der Vitalität einer Biozönose angenommen werden. Für das Überleben der Organismen ausschlaggebend ist jedoch die Zufuhr reduzierter Komponenten (CH_4) zum Aufbau organischer Substanz. Möglicherweise bewegt sich das Methan unabhängig von den Vent-Fluiden, aber entlang derselben Wege. Ein entsprechender Gasdruck im Sediment würde so eine gleichmäßige Versorgung garantieren, auch wenn die Ausstromraten der Fluide variabel sind.

Der Beweis für die Variabilität der Vent-Fluide, d.h. entweder ihres Chemismus oder ihres Volumens, liegt in (1) der Aufzeichnung des geochemischen Umfeldes in Hartteilen von Organismen, (2) *in situ*-Momentaufnahmen des Fluid-Ausstroms und (3) langfristigen direkten Beobachtungen in Vent-Gebieten.

6.1 Aufzeichnungen in Muschelschalen und Wurmrohren

An Organismen von zwei Lokalitäten vor Oregon und drei Lokalitäten vor Peru wurden Spurenelementanalysen an Hartteilen durchgeführt. Alle Hartteile von Organismen wurden für die Spurenanalyse kontinuierlich beprobt. Da das Wachstum der Organismen z.B. in verzahnten Schuppen (Muschelschalen) oder versetzt übereinander liegenden Schuppen (*L. barhami*) erfolgt, repräsentiert jede Einzelprobe Mischwerte aus unterschiedlichen Wachstumsschüben. Die entsprechenden Spurenelement-Profile können daher a priori als "geglättet" angesehen werden.

In allen Untersuchungsgebieten wurden Phasen der Anreicherung von Spurenelementen nachgewiesen, die parallel von voneinander unabhängigen Elementen beschrieben wurden. Aus klimatisch beeinflussten Molluskenschalen sind saisonal bedingte Variationen und Variationen durch anthropogenen Eintrag von Spurenelementen bekannt (DUNCA & NYSTRØM 1994, SEIRE et al. 1994, WESTERMARK et al. 1994 (a+b)).

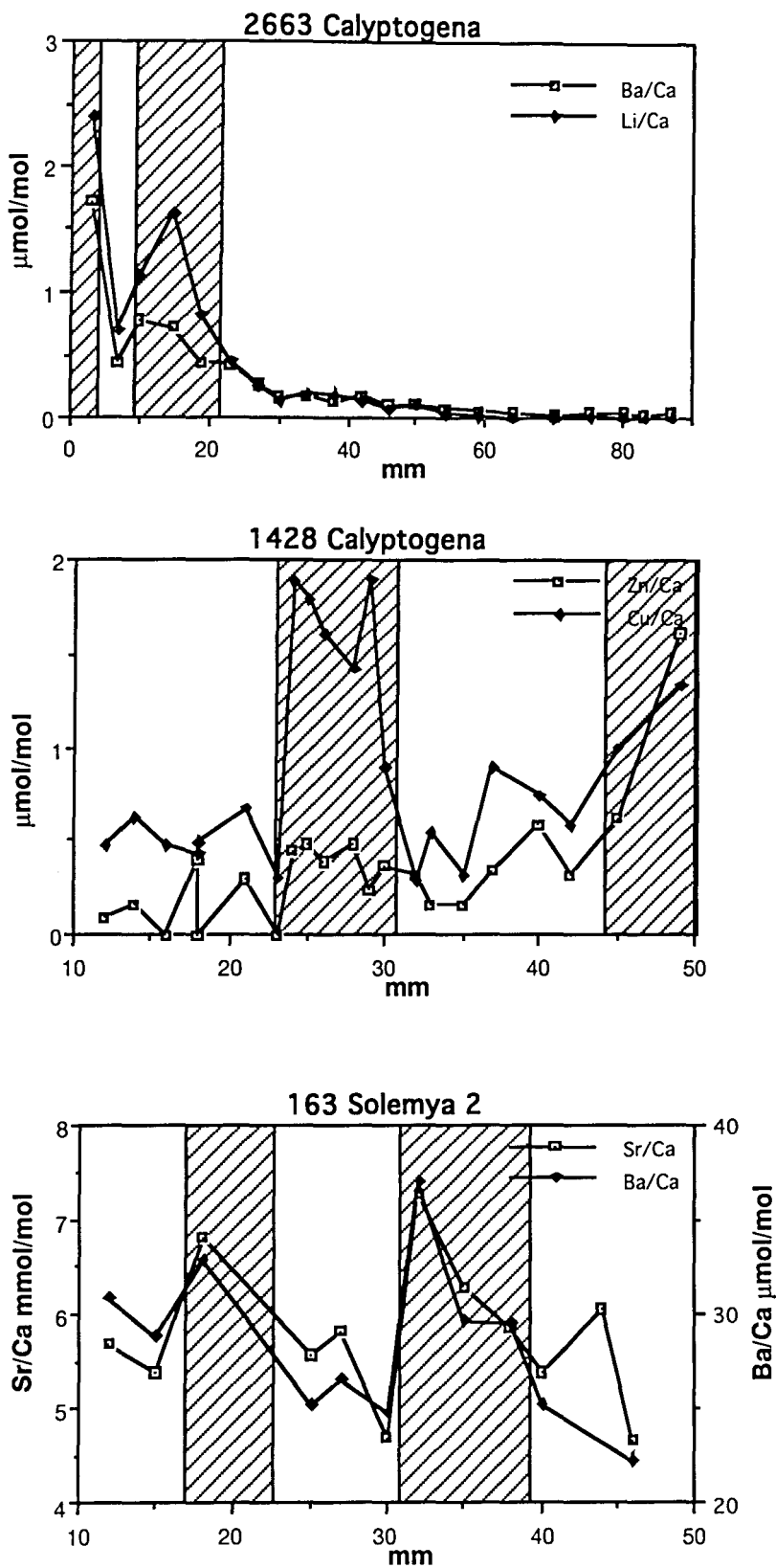


Abb. 30 Phasen des Fluidausstroms werden in Muschelschalen aufgezeichnet, dargestellt an verschiedenen Organismen aus unterschiedlichen Gebieten; schraffierte Bereiche geben Phasen verstärkten Ventings an.

Sie zeichnen sich durch zyklische Wiederkehr eines bestimmten Verteilungsmusters aus oder zeigen langfristige Tendenzen auf. Konzentrationsniveaus variieren dabei in Abhängigkeit von dem jeweiligen geochemischen Milieu.

Die untersuchten Spurenelementprofile aus den Arbeitsgebieten vor Peru und Oregon zeigen demgegenüber keine zyklische Variabilität oder Tendenz. Konzentrationen innerhalb eines Profils schwanken auch nicht um einen Mittelwert, sondern zeigen Anreicherungen oberhalb einer Basis-Variabilität (Abb. 30). Diese Beobachtung erstreckt sich sowohl auf Muschelschalen (*Calypptogena* + *Solemya*) als auch auf Wurmrohren (calcitische Serpuliden, organische Vestimentifera) und kann daher als generelles Charakteristikum gelten.

Diese Phasen werden als Phasen verstärkten Ventings interpretiert, die in den Hartteilen von Organismen aufgezeichnet werden.

6.2 Vent-Fluide

In allen Arbeitsgebieten wurden Ausstrommessungen durchgeführt und z.T. sequentiell Bodenwasserproben entnommen. In einigen Fällen wurden signifikante Ausstromraten gemessen (Tab. 9, unveröff. Daten). Bei der Anreicherung unterschiedlicher geochemischer Komponenten (CH_4 , Spurenelemente) zeigte sich ebenfalls ein uneinheitliches Bild. Ausstrommessungen an bestimmten Vent-Biozönosen, die nach längerer Zeit wiederholt wurden (z.B. am Bioherm und Site 1428), ergaben keine reproduzierbaren Raten.

Alle Messungen wurden gezielt im Bereich vitaler Biozönosen durchgeführt, d.h. ein anhaltender Ausstrom von Vent-Fluiden ist a priori bewiesen. Ist er trotzdem nicht nachweisbar und zeigen Spurenelementprofile von Organismen phasenhafte Anreicherungen, ist davon auszugehen, daß die Ausstromrate der Fluide schwankt.

In situ Messungen stellen daher immer nur eine Momentaufnahme der Bedingungen dar und erlauben keine Rückschlüsse auf die zeitliche Entwicklung des Ausstroms. Nicht-reproduzierbare Messungen von Ausstromraten beweisen die Diskontinuität des Gesamtprozesses.

6.3 Langfristige Beobachtungen in Vent-Gebieten

Die Vent-Gebiete im Bereich der Cascadia-Subduktionszone wurden über einen Zeitraum von 9 Jahren wiederholt besucht. Dabei wurden Organismen gesammelt, Wasserproben entnommen und Ausstrommessungen durchgeführt. Extreme Ausstromraten von hochgerechnet $1765 \text{ l/m}^2\text{d}$ (LINKE ET AL. 1994) im Jahre 1989 und die Beobachtung riesiger Muschelfelder sowie immenser authigener Carbonatstrukturen im Gebiet Bioherm rechtfertigten das Abteufen einer ODP-Bohrung in diesem Gebiet, um eine Extremsituation zu erfassen. Bei Rückkehr in dieses Gebiet 1993 sind kaum mehr lebende Organismen aufzuspüren. Die Carbonatstrukturen, die häufig zu einem großen Prozentsatz aus Muschelschalen bestehen, zeugen von einer "untergegangenen blühenden Kultur". Vereinzelt finden sich Neuansiedlungen junger Calyptogenen. Das zwischenzeitliche vollständige Absterben aller Vent-Organismen zeigt, daß der Ausstrom der Fluide unter das existenzsichernde Niveau abgesunken ist bzw. unterbrochen worden sein muß. Die geringe Ausdehnung junger Ansiedlungen spricht auch nicht für eine Rückkehr zu den alten Verhältnissen.

Das hydrologische System hat sich hier also offenbar vollständig verändert, während in anderen nahegelegenen Gebieten (1428 und 1900) keinerlei Veränderung stattgefunden hat.

Die Diskontinuität des Fluid-Ausstroms innerhalb einer geologischen Großstruktur ist mithin sowohl im Aussetzen des Ausstroms (6.3) als auch in der Variabilität anhaltenden Ausstroms (6.1+6.2) beobachtet worden.

7 Biogeochemische Implikationen des Fluid-Venting

Biogeochemische Untersuchungen bilden ein Instrumentarium, komplexe Prozesse und Situationen von verschiedenen Standpunkten aus (interdisziplinär) zu beschreiben. In der vorliegenden Arbeit wurde versucht, mit Hilfe chemischer Analytik an vorwiegend biologischem Material Aufschlüsse über geologische Prozesse zu erlangen.

Dabei bilden Standard-Analysemethoden der Geochemie das Werkzeug. Biologischen Prozessen wurde bei der Auswahl der Proben Rechnung getragen. Sie wurden an genau definierten Stellen entnommen. Geologische und tektonische Prozesse haben über lange Zeiträume die Umweltbedingungen für die Organismen geschaffen. Geologie und Biologie sind hier nicht voneinander zu trennen. Eine ganzheitliche Erfassung des Systems beruht auf drei Säulen (Abb. 31):

- (1) Geologische Aufnahme (Seismik, Sedimentologie)
- (2) Biologische Aufnahme
- (3) Chemische Analytik unter Berücksichtigung von (1)+(2)

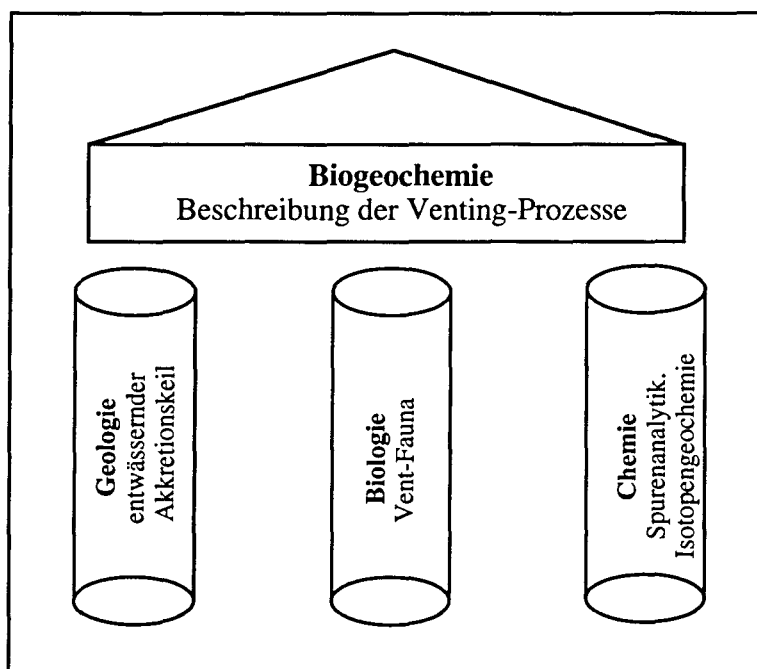


Abb. 31 Erfassung der Prozesse in Vent-Gebieten

Durch Anwendung der beschriebenen Arbeitsmethoden ist es möglich, weitreichende Aussagen über den "Lebenswandel" der Vent-Gebiete vor Peru und Oregon zu machen. Grundlage dafür ist die Beantwortung der eingangs gestellten Fragen:

In welchem Zusammenhang stehen Spurenelementverteilungen und Isotopensignale in biogenen Hartteilen mit dem Vent-Geschehen?

Spurenelemente in biogenen Hartteilen reflektieren die sie umgebenden Milieubedingungen. Veränderungen werden aufgezeichnet. Damit stehen die biogenen Hartteile als Datenspeicher über die gesamte Lebenszeit eines Organismus zur Verfügung.

In den Untersuchungsgebieten entstammen die Vent-Fluide den Sedimenten der Akkretionskeile. Die Spurenelementkonzentrationen in Organismen geben die Signatur der Quellen wieder. Ein spezifisches geochemisches Milieu (z.B. Upwelling-Bedingungen) kann somit auch ohne Kenntnis der hydrographischen Bedingungen nachgewiesen bzw. rekonstruiert werden.

Stabile Isotope zeigen in erster Linie die biologische Dynamik eines Organismus an. Dabei sind $\delta^{18}\text{O}$ -Daten nicht als Paläothermometer zu verwenden. $\delta^{13}\text{C}$ -Signale werden von Venting-Prozessen beeinflusst, reflektieren jedoch allgemein nicht deren Dynamik. Nur außergewöhnlich stark ausgeprägte Venting-Ereignisse schlagen sich in den Isotopsignalen nieder.

Sind Aussagen über die Lebensdauer von Vents möglich?

Über die Korrelation von Spurenelement-Profilen zu unterschiedlichen Zeiten entnommener *Calyplogena*-Schalen in einem Vent-Gebiet und die Korrelation von Schalen- und Röhrenprofilen ist eine zeitliche Eingrenzung der Venting-Phänomene möglich geworden. Während Einzelereignisse vor Oregon im Zeitraum von Monaten bis Jahren stattfinden, erstrecken sie sich vor Peru wahrscheinlich auf Zeiträume von wenigen Monaten. Veränderungen im hydrologischen System, die das Venting unterbinden, können vor Oregon mit Zeitspannen von ≤ 10 bis 10^2 Jahren angegeben werden.

Ist das Venting ein kontinuierlicher Prozeß?

Fluid-Venting, so wie es in den Hartteilen der Organismen reflektiert wird und durch *in situ*-Messungen bestätigt wurde, ist kein kontinuierlicher Prozeß. Phasen verstärkten Ventings, in denen der Fluid-Ausstrom direkt meßbar ist, wechseln mit Phasen geringfügigen, gleichmäßigen Ausstroms ab. Ein minimaler Ausstrom, der noch nicht quantifiziert wurde muß jedoch über die gesamte Lebensspanne einer Vent-Biozönose, zur Existenzsicherung, gewährleisten sein.

Welche Spurenelemente/stabile Isotope sind von Bedeutung?

Die "Inventur" von Spurenelementen und stabilen Isotopen an biogenen Hart- und Weichteilen hat gezeigt, daß vor allem die Gesamtheit der Elemente für die Rekonstruktion des Vent-Geschehens nützlich ist. Genetisch voneinander unabhängige Komponenten zeigen parallele Signale. Durch Betrachtung mehrerer Elemente können analytische Unsicherheiten erkannt und berücksichtigt werden. Spurenelementkonzentrationen in Weichteilen bestätigen die Verlässlichkeit der Hartteile als Datenspeicher.

Mit Hilfe der Untersuchung stabiler Isotope an Hartteilen kann eine "Normalität" der Biorhythmik von Organismen in einem ungewöhnlichen Milieu zugrunde gelegt werden.

Wie sind die Wachstumsgeschwindigkeiten von Vent-Organismen?

Wachstumsgeschwindigkeiten von Organismen an einer ausgewählten Lokation vor Oregon können mit $3,0 \pm 0,9$ mm pro Jahr für *Calyptogena* angegeben werden. Die Wachstumsgeschwindigkeit eines ausgewachsenen *L. barhami*-Individuums war 4,5 mal so hoch, also ca. 14 mm pro Jahr.

Wachstumsgeschwindigkeiten von *Calyptogena* liegen im Bereich bekannter Wachstumskurven der Hot Vent-Biozönosen. Die für *L. barhami* liegen eine Größenordnung unter den einzigen bekannten Werten, die unter optimalen Bedingungen erreicht wurden und erscheinen daher realistisch.

Die vorliegenden Untersuchungen geben Hinweise auf die zeitliche Dynamik von Venting-Prozessen. Die erwiesene Diskontinuität des Fluid-Ausstroms relativiert die bisherigen Diskrepanzen in der Quantifizierung von Vent-Fluiden. Generell können Abschätzungen aus *in situ*-Messungen als zu hoch gelten. Abschätzungen aus physikalischen Parametern der Sedimente sind dann zu niedrig, wenn (a) zusätzlich zu den aus den Sedimenten stammenden Fluiden "Recharge-Zonen" existieren oder (b) in bearbeiteten Profilen Entwässerungsbahnen unterrepräsentiert sind, um in geeigneten Proportionen zu interpolieren. Die räumliche Verteilung von Vent-Biozönosen sowie eine Abschätzung relativer Venting-Aktivität aufgrund regionaler Vergleiche von Spurenelementkonzentrationen gibt wertvolle Hinweise auf die Gesamtsituation.

Die Untersuchungen haben gezeigt, daß die komplexen Prozesse der Entwässerung an Akkretionskeilen nicht als pars pro toto zu bearbeiten sind. Alle Parameter im System sind variabel und müssen daher flächendeckend untersucht werden, um zu einem

realistischen Gesamtbild zu führen. Die Inventarisierung geochemischer Komponenten, die Gegenstand dieser Arbeit ist, kann eine Datenbasis für weiterführende Untersuchungen bilden. Intensität und Variabilität von Venting-Prozessen kann auf dieser Grundlage klassifiziert werden.

Die übergeordnete Fragestellung der Einflußgröße von Cold Seeps in globalen Stoffkreisläufen kann nicht definitiv beantwortet werden. Hart- und Weichteile von Organismen sowie Vent-Fluide weisen z.T. erhebliche Spurenelement-Anreicherungen auf. Ein steter Austritt von Methan ist überall gewährleistet, wo Vent-Biozönosen auftreten. Vor Oregon entstehen dadurch massive Carbonatkrusten. Vor Peru sind Barytkrusten als authigene Bildungen weit verbreitet. Die oberflächlichen Erscheinungen des Venting führen also zur Anreicherung verschiedener geochemischer Komponenten. Dabei findet ein Massentransport aus dem Akkretionskeil an die Sedimentoberfläche, also auf den Akkretionskeil, statt. Im Zuge weitergehender konvergenter Plattenbewegungen werden diese Bereiche langfristig wahrscheinlich weiter gestaucht, verschuppt und erodiert, so daß ein Recycling-Prozeß einsetzt.

Eine Auswirkung der Anreicherungen auf die gesamte Wassersäule konnte bisher nicht nachgewiesen werden, ist aber nicht auszuschließen. Es muß daher zunächst von einem internen Kreislauf ausgegangen werden.

Spurenelement-Akkumulationen in Hart- und Weichteilen von Organismen sowie in Krustenbildungen sind signifikant. Die Gebiete aktiven Ventings sind jedoch von geringer flächenhafter Ausdehnung und fleckenhaft verteilt.

Die Bedeutung der Cold Seeps an konvergenten Plattenrändern für die Grundlagenforschung ist daher hauptsächlich in der *in situ* Aufzeichnung geologischer Prozesse zu sehen. Als in ihrer Komplexität sehr sensible Systeme können sie als Mosaikstein für die Erforschung plattentektonischer Vorgänge eine wichtige Rolle spielen. Beispielsweise für das Auffinden und Diagnostizieren fossiler Subduktionszonen, aber auch als Datenspeicher für Milieu-Informationen.

Maßgeblich für zukünftige Untersuchungen sollten drei Themenschwerpunkte sein:

- (1) Verfeinerung der geochemischen Datenbasis. Insbesondere *in situ* Untersuchungen (Laborexperimente) über den Einbaumechanismus von Spurenelementen in biogene Hartteile bei künstlichen Ereignissen unter gleichzeitiger Kontrolle der Wachstumsstrukturen.
- (2) Beschreibung der Dynamik von Vent-Prozessen anhand von Daueruntersuchungen und wiederholten Messungen in demselben Gebiet.

- (3) Beschreibung und Korrelation von Vent-Ereignissen. Diese setzt die zeitliche Einordnung der Prozesse voraus. Da Akkretionskeile Bestandteile aktiver geologischer Großstrukturen sind, ist es naheliegend, daß sich tektonische Ereignisse (Erdbeben) auch auf die Entwässerungsdynamik der Akkretionskeile auswirkt, möglicherweise im Vorfeld der Ereignisse.

8 Zusammenfassung

"Cold Seeps" vor Oregon und Peru, die sich durch spezielle Organismengemeinschaften auszeichnen, stehen in engem Zusammenhang mit tektonischen Prozessen an konvergenten Plattenrändern. Spuren- und Isotopenanalysen wurden hochauflösend an Molluskenschalen und Wurmrohren sowie an Weichteilen der Organismen durchgeführt, um eine Bestandsaufnahme biogeochemischer Parameter zu erhalten.

Spurenelementprofile der Schalen und Röhren zeigen Signale austretender Vent-Fluide, da Variationen in voneinander unabhängigen Elementen nachvollzogen werden können. Barium vor Peru und Lithium vor Oregon sind dabei als diagnostische Parameter für Sedimentationsprozesse des Ablagerungsraumes, dem die Fluide entstammen, von besonderer Bedeutung. Regionale Vergleiche von Spurenelement-Daten können Hinweise auf unterschiedliche Fluid-Systeme geben.

Analysen stabiler Isotope ($\delta^{18}\text{O}$ und $\delta^{13}\text{C}$) bestätigen die biogene Herkunft des Methans das hier die Nahrungsgrundlage für Vent-Organismen darstellt. Profile von Molluskenschalen und Wurmrohren reflektieren den biologischen Rhythmus eines Organismus und nicht die Veränderung im geochemischen Milieu.

Die Variabilität geochemischer Parameter sowie direkte Beobachtungen von Vent-Fluiden und Organismengemeinschaften charakterisieren das Fluid-Venting als einen diskontinuierlichen Prozeß.

Aus der Beobachtung biogeochemischer Signale und der Entwicklung und Veränderung von Vent-Biozönosen vor Oregon über einen Zeitraum von 9 Jahren kann, in erster Annäherung, eine Zeitskala für Venting-Prozesse aufgestellt werden. Danach kann der Zeitraum anhaltenden Fluid-Ventings an einem Ort mit 10 bis 10^2 Jahren angegeben werden.

Die chemische Analyse biogenen Materials an Subduktions-Vents gibt Hinweise auf geologische Prozesse an konvergenten Plattenrändern. Die angewendete Arbeitsmethode liefert damit einen Mosaikstein für das Verständnis der komplexen Zusammenhänge einer speziellen Ausprägung plattentektonischer Bewegung. Sie kann dazu dienen, fossile Vent-Vergesellschaftungen zu erkennen. Aufbauend auf der Inventarisierung unterschiedlicher Spurenstoffe, der zeitlichen Einordnung der Venting-Prozesse und der Berücksichtigung von deren Dynamik können weitergehende Untersuchungen zur Bilanzierung von Stoffflüssen an Subduktions-Vents führen.

Abstract

Cold seeps off Peru and Oregon marked by special communities of benthic organisms, are closely related to tectonic processes at convergent margins. High-resolution trace-element and stable isotope analyses were carried out on mollusc shells and worm tubes, as well as soft tissues, in order to characterize biogeochemical parameters in this unique environment.

Shell and tube trace-element profiles show signals of discharged vent-fluids since the chemically independent elements co-vary fully with each other. Barium and lithium distributions off the coast of Oregon are of special interest as indicators for sedimentation processes in these depositional environments, from which fluid venting occurs. By comparing the local trace-elements the differing fluid systems can be distinguished.

Stable isotope analyses ($\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$) confirm the biogenic origin of methane, which acts as the nutritional source for vent-biocoenoses. Mollusc shell and tube-worm profiles appear to reflect the biological growth rhythm of organisms, rather than changes in the geochemical environment.

The variability of geochemical parameters as well as direct observations of fluid venting indicate that the latter is a discontinuous process.

The time scale of the venting process is estimated from observed biogeochemical signals and from the development and changes of vent-communities over a 9 years period. Continuous local fluid-flow appears to occur over a period of 10 to 10^2 years.

Chemical analyses on biogenic material from subduction vent environments provides insights on the geological processes at convergent margins. A rosette stone for the knowledge of complex interactions resulting from plate movements can be found through application of the described method. This may permit the recognition of fossil vent-communities. Further studies of the geochemical fluxes in subduction-vents will enable the dating of vent processes and give further information concerning their dynamics.

9 Literatur

- Afaj, A.H. & A.H. Elewe, 1989. Trace element distribution in mollusk shells from Khor Al-Zubair. *J. Biol. Sci. Res.* 20: 581-591.
- Al-Dabbas, M.A.M., F.H. Hubbard & J. McManus, 1984. The shell of *Mytilus* as an indicator of zonal variations of water quality within an estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Sci.* 18: 263-270.
- Aquilina, L., A.N. Dia, J. Boulègue, A.-M. Fouillac, E. Suess, M. von Breymann & J. Bourgois, 1992. Geochemistry of barite and carbonate deposits associated with fluid vents in the Peru convergent margin off Paita. AGU Spring Meeting, EOS 73: 153
- Ballard, R.D., 1977. Notes on a major oceanographic find. *Oceanus* 20: 35-44
- Bangs, N.L.B., G.K. Westbrook, J.W. Ladd & P. Buhl, 1990. Seismic velocities from Barbados Ridge complex: indicators of high pore fluid pressures in an accretionary complex. *J. Geophys. Res.* 95: 8767-8782.
- Beauchamp, B., H.R. Krouse, J.C. Harrison, W.C. Nassichuk & L.S. Eliuk, 1989. Cretaceous cold-seep communities and methane-derived carbonates in the Canadian Arctic. *Science* 244: 53-56.
- Beck, W.J., R.L. Edwards, E. Ito, F.W. Taylor, R. Recy, F. Rougerie, P. Joannot & Ch. Henin, 1992. Sea-surface temperature from coral skeletal strontium/calcium ratios. *Science* 257: 644-647.
- Bekins B. & S. Dreiss, 1992. Parameters controlling dewatering in accretionary prisms. *Earth Planet. Sci. Lett.* 109: 275-287.
- Berg, C. jr., 1985. Reproductive strategies of molluscs from abyssal hydrothermal vent communities. *Biol. Soc. Wash. Bull.* 6: 185-197.
- Boss, K.J. & R.D. Turner, 1980. The giant white clam from the Galapagos Rift, *Calyptogena magnifica* species novum. *Malacologia* 20: 161-194.
- Boulègue, J. A. Mariotti, A. Fiala & J. Bourgois, 1992 Geochemistry of clams from subduction zones. AGU Spring Meeting, EOS 73: 153
- Boulègue, J., E.L. Benedetti, D. Dron, A. Mariotti & R. Létolle, 1987. Geochemical and biogeochemical observations on the biological communities associated with fluid venting in Nankai Trough and Japan Trench subduction zones. *Earth Planet. Sci. Lett.* 83: 343-355.
- Bourgois, J. and 11 others, 1988. SeaBeam and seismic reflection imaging of the tectonic regime of the Andean continental margin off Peru (4°S to 10°S). *Earth Planet. Sci. Lett.* 87: 111-126.
- Bourgois, J., P. Huchon & G. Pautot, 1990. Tectonics of the Peru active margin. In: Auboin, J & J. Bourgois (eds.), *Tectonics of the circum-Pacific continental margins: International Geological Congress, 28th, Washington D.C. Proceedings*: 77-137.
- Bourgois, J., Y. Lagabrielle, P. De Wever, E. Suess & NAUTIPERC-Team, 1993. Tectonic history of the northern Peru convergent margin during the past 400 ka. *Geology* 21: 531-534.

- Boyle, E.A., 1988. Cadmium: chemical tracer of deep water paleoceanography. *Paleoceanography* 3: 471-489.
- Bray, C.J. & E.D. Karig, 1985. Porosity of sediments in accretionary prisms and some implications for dewatering processes. *J. Geophys. Res.* 90: 768-778.
- Brooks, J.M., M.C. Kennicutt, R.R. Bidigare, T.L. Wade, E.N. Powell, G.J. Denoux, R.R. Fay, J.J. Childress, C.R. Fisher, J. Rossmann & G. Boland, 1987. Hydrates, oil seepage, and chemosynthetic ecosystems on the Gulf of Mexico slope: an update. *EOS* 68: 498-499.
- Bruland, K.W., 1983. Trace elements in sea water. In: *Chemical Oceanography*, J.P. Riley & R. Chester (eds.), 8: 157-220. London, Academic Press.
- Callender, W.R. & E.N. Powell, 1992. Taphonomic signature of petroleum seep assemblages on the Louisiana upper continental slope: recognition of autochthonous shell beds in the fossil record. *Palaios* 7: 466-484.
- Calvert, S.E. & N.B. Price, 1983. Geochemistry of Namibian shelf sediments. In: J. Thiede & E. Suess (Eds.), *Coastal Upwelling, Part B*: 337-375.
- Carpenter, S.J. & K.C. Lohmann, 1992. Sr/Mg ratios of modern marine calcite: empirical indicators of ocean chemistry and precipitation rate. *Geochim. Cosmochim. Acta* 56: 1837-1849.
- Carson, B. E. Suess & J.C. Strasser, 1990. Fluid flow and mass flux determinations at vent sites on the Cascadia Margin accretionary prism. *J. Geophys. Res.* 95(B6): 8891-8897.
- Carson, B., M.L. Holmes, K. Umstattd, J.C. Strasser & H.P. Johnson, 1991. Fluid expulsion from the Cascadia accretionary prism: evidence from porosity distribution, direct measurements, and GLORIA imagery. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* 335: 331-340.
- Cavanaugh, C.M., 1983. Symbiotic chemoautotrophic bacteria in marine invertebrates from sulphide-rich habitats. *Nature* 302: 58-61.
- Chan, L.H., J.M. Edmond, G. Thompson & K. Gillis, 1992. Lithium isotopic composition of submarine basalts: implications for the lithium cycle in the oceans. *Earth Planet. Sci. Lett.* 108: 151-160.
- Chester, R. 1990. *Marine Geochemistry*. Unwin Hyman Ltd., London, 698 pp.
- Childress, J.J., C.R. Fisher, J.M. Brooks, M.C. Kennicutt II, R. Bidigare & A.E. Anderson, 1986. A methanotrophic marine molluscan (*Bivalvia*, *Mytilidae*) symbiosis: mussels fueled by gas. *Science* 233: 1306-1308.
- Corliss, J.B. & R.D. Ballard, 1977. Oases of life in the cold abyss. *Nat. Geographic*. 152: 441-453.
- Corliss, J.B., J. Dymond, L.I. Gordon, J.M. Edmond, R.P. von Herzen, R.D. Ballard, K. Green, D. Williams, A. Brainridge, K. Crane & T.H. von Andel, 1979. Submarine thermal springs of the Galapagos Rift. *Science* 203: 1073-1083.
- Dando, P.R., A.J. Southward, E.C. Southward, D.R. Dixon, A. Crawford & M. Crawford, 1992. Shipwrecked tube worms. *Nature* 356: 667.

- Davis, E.G., R.D. Hyndman & H. Villinger, 1990. Rates of fluid expulsion across the northern Cascadia accretionary prism: constraints from new heat flow and multichannel seismic reflection data. *J. Geophys. Res.* 95: 8861-8889.
- DeMets, C., R.G. Gordon, D.F. Argus & S. Stein, 1990. Current plate motions. *Geophys. J. Int.* 101: 425-478.
- Desbruyères, D., A.-M. Alayse-Danet, S. Otha & Scientific Party of Biolau and Starmer Cruises, 1994. Deep-sea hydrothermal communities in Southwestern Pacific back-arc basins (the North Fiji and Lau Basins): composition, microdistribution and food web. *Mar. Geol.* 116: 227-242.
- Dia, A.N., L. Aquilina, J. Boulegue, J. Bourgois, E. Suess & M. Torres, 1993. Origin of fluids and related barite deposits at vent sites along the Peru convergent margin. *Geology* 21: 1099-1102.
- Dia, A.N., L. Aquilina, J. Boulègue, E. Suess, M. von Breymann & J. Bourgois, 1992. Fluids from the Peru subduction zone vents: trace element and isotopic constraints. AGU Spring Meeting, EOS 73: 153
- Druffel, E.R.M. & P.M. Williams, 1992. Importance of isotope measurements in marine organic geochemistry. *Mar. Chem.* 39: 209-215.
- Dunca, E. & H. Mutvei, 1994. Periodic microgrowth patterns in shells of freshwater unionid bivalves. *Bulletin de l'Institut océanographique, Monaco, numéro spécial 13*, in press
- Dunca, E. & J. Nystrøm, 1994. Using the freshwater bivalve as an environmental indicator. *Bulletin de l'Institut océanographique, Monaco, numéro spécial 13*, in press
- Duncan, R.A. & L.D. Kulm, 1989. Plate tectonic evolution of the Cascades arc-subduction complex. In: Winterer, E.L., D.M. Hussong & R.W. Decker (eds.), *The Eastern Pacific Ocean and Hawaii*. *Geol. Soc. Am., Geology of North America Vol. N.*: 413-438.
- Edmond, J.M. & K. von Damm, 1983. Hot springs on the ocean floor. *Scientific American* (255/4): 78-93.
- Endow, K. & S. Otha, 1989. The symbiotic relationship between bacteria and a mesogastropod snail, *Alviniconcha hessleri*, collected at the hydrothermal vents of the Mariana Back-arc Basin. *Bull. Japan. Soc. Microbiol. Ecol.* 3: 73-82.
- Epstein, S., R. Buchsbaum, H.A. Lowenstam & H.C. Urey, 1953. Revised carbonate-water isotopic temperature scale. *Bull. Geol. Soc. Am.* 64: 1315-1326.
- Felbeck, H. 1981. Chemoautotrophic potential of the hydrothermal vent tube worm, *Riftia pachyptila* Jones (Vestimentifera). *Science* 213: 336-338.
- Felbeck, H., 1983. Sulfide oxidation and carbon fixation by the gutless clam *Solemya reidi*: an animal-bacteria symbiosis. *J. Comp. Physiol.* 152: 3-11.
- Felbeck, H., J.J. Childress & G.N. Somero, 1981. Calvin-Benson cycle and sulphide oxidation enzymes in animals from sulphide-rich habitats. *Nature* 293: 291-293.
- Fiala-Médioni, A. & M. Le Pennec, 1988. Structural adaptations in the gill of the japanese subduction zone bivalves (Vesicomyidae) *Calyptogena phaseoliformis* and *Calyptogena laubieri*. *Oceanologica Acta* 11: 185-192.

- Fiala-Médioni, A. & M. Le Pennec, 1989. Adaptive features of the bivalve mollusc associated with fluid venting in the subduction zones off Japan. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 71: 161-167.
- Fiala-Médioni, A., J. Boulègue, S. Otha, H. Felbeck & A. Mariotti, 1993. Source of energy sustaining the *Calymene* populations from deep trenches in subduction zones off Oregon. *Deep-Sea Res.* 40: 1241-1258.
- Fiala-Médioni, A., J.-C. Michalski, J. Jolles, C. Alonso & J. Montreuil, 1994. Lysosomal and lysozyme activities in the gill of bivalves from deep hydrothermal vents. *C. R. Acad. Sci Paris, Sciences de la Vie/Life Sciences* 317: 239-244.
- Fiala-Médioni, A., M. Sibuet, M. Segonzac & J. Bourgois, 1992. Biological communities associated with cold vents in the Peru trench. AGU Spring Meeting, EOS 73: 153
- Fisher, C.R., J.M. Brooks, J.S. Vodenichar, J.M. Zande, J.J. Childress & R.A. Burke jr., 1993. The co-occurrence of methanotrophic and chemoautotrophic sulfur-oxidizing bacterial symbionts in a deep-sea mussel. *Mar. Ecol.* 14: 277-289.
- Flügel, H.J. & I. Langhof, 1983. A new hermaphroditic pogonophore from the Skagerak. *Sarsia* 68: 131-138.
- Flügel, H.J., 1990. A new species of siboglinium (pogonophora) from the North Atlantic and notes on *Nereilinum murmanicum* Ivanov. *Sarsia* 75: 233-241.
- Fowler, S.R., R.S. White & K.E. Loudon, 1985. Sediment dewatering in the Makran accretionary prism. *Earth Planet. Sci. Lett.* 75: 427-438.
- Fritz, L.W., L.M. Ragone & R.A. Lutz, 1990. Biomineralization of barite in the shell of the freshwater asiatic clam *Corbicula fluminea* (Mollusca: Bivalvia). *Limnol. Oceanogr.* 35: 756-762.
- Gaill, F. & S. Hunt, 1986. Tubes of deep sea hydrothermal vent worms *Riftia pachyptila* (Vestimentifera) and *Alvinella pompejana* (Annelida). *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 34: 267-274.
- Gal'chenko, V.M., S.V. Galkin, A.I. Lein, L.J. Moskalev & M.V. Ivanov, 1988. Role of bacterial symbionts in nutrition of invertebrates from areas of active underwater hydrotherms. *Oceanology* 28: 768-794.
- Gärdenfors, U., A. Bignet, B. Carell, S. Forberg, H. Mutvei & T. Westermarck, 1994. Environment composition of some land snail shells (Mollusca, Gastropoda) and observations of environmental interest. Manuskript.
- Goldberg, E.D. & G.O.S. Arrhenius, 1958. Chemistry of pacific pelagic sediments. *Geochim. Cosmochim. Acta* 13: 153-212.
- Hook, J.E. & S. Golubic, 1993. Microbial shell destruction in deep-sea mussels, Florida Escarpment. *Mar. Ecol.* 14: 81-89.
- Hovland, M. & A.J. Judd, 1988. Seabed Pockmarks and Seepages. Graham & Trotman, London/Dordrecht/Boston, 293 pp.
- Hudson, D.J., 1977. Stable isotopes and limestone lithification. *Geol. Soc. Lond. J.* 133: 637-660.
- Jones M.L. & S.C. Gardiner, 1988. Evidence for a transient digestive tract in

Vestimentifera. Proc. Biol. Soc. Wash. 101: 423-433.

- Jones M.L. & S.L. Gardiner, 1989. On the early development of the Vestimentifera tube worm *Ridgeia* sp. and observations on the nervous system and trophosome of *Ridgeia* sp. and *Riftia pachyptila*. Biol. Bull. 177: 254-276.
- Jones, D.S., D.F. Williams & C.S. Romanek, 1986. Life history of symbiont-bearing giant clams from stable isotopes profiles. Science 231: 48-48.
- Jones, M.L., 1985. On the vestimentifera: new phylum: six new species, and other taxa, from hydrothermal vents and elsewhere. Biol. Soc. Wash. Bull. 6: 117-158.
- Jones, M.L., 1988. The Vestimentifera, their biology, systematic and evolutionary pattern. Oceanol. Acta, Biology and Ecology Symposium, Paris, 4-7 November, 1985, Proceedings: 6-82.
- Jones, M.L., 1981. *Riftia pachyptila* Jones: Observations on the vestimentiferan worm from the Galapagos Rift. Science 213: 333-336.
- Juniper S.K. & M. Sibuet, 1987. Cold seep benthic communities in Japan subduction zones: spatial organization, trophic strategies and evidence for temporal evolution. Mar. Ecol. Prog. Ser. 40: 115-126.
- Kastner, M., H. Elderfield & J.B. Martin, 1991. Fluids in convergent margins: what do we know about their composition, origin, role in diagenesis and importance for oceanic chemical fluxes? Phil. Trans. R. Soc. Lond. A 335: 243-259.
- Kastner, M., H. Elderfield, J.B. Martin, E. Suess, K.A. Kvenvolden & R.E. Garrison, 1990. Diagenesis and interstitial water chemistry at the Peruvian continental margin: major constituents and strontium isotopes. In: E. Suess, R. von Huene, et al.; Proc. Ocean Drilling Program, Sci. Res. 112: 413-440.
- Kemp, A.E.S. & N. Lindsley, 1990. Variations in structural style within Peruvian forearc sediments. In: E. Suess & R. v. Huene et al. (Eds.), Proc. Ocean Drilling Program, Sci. Res. 112: 17-36.
- Kennicutt II, MC., R.A. Burke jr., I.R. MacDonald, J.M. Brooks, G.J. Denoux & S.A. Macko, 1992. Stable isotope partitioning in seep and vent organisms: chemical and ecological significance. In: S.A. Macko & M.H. Engel (Guest Editors), Isotope Fractionations in Organic Matter: Biosynthetic and Diagenetic Processes. Chem. Geol. (Isotop Geosci. Sect.), 101: 293-310.
- Khoo, H.W., K.F. Mok, S.M. Tang & C.T. Yap, 1985. Strontium/calcium ratio analysis of molluscan shells in Singapore waters using the x-ray fluorescence technique. Environmental Monitoring and Assessment 5: 325-332.
- Killingley, J.S., W.H. Berger, K.C. McDonald & W.A. Newman, 1980. 18O/16O variations in deep-sea carbonate shells from the Rise hydrothermal field. Nature 287: 218-221.
- Krissek, L.A. & K.F. Scheidegger, 1983. Environmental controls on sediment texture and composition in low oxygen zones off Peru and Oregon. In: J. Thiede & E. Suess (Eds.), Coastal Upwelling, Part B: 163-180
- Kulm, L.D., E. Suess, J.C. Moore, B. Carson, B.T. Lewis, S.D. Ritger, D.C. Kadko, T.M. Thornburg, R.W. Embley, W.D. Rugh, G.J. Massoth, M.G. Langseth, G.R. Cochrane, R.L. Scamman, 1986. Oregon subduction zone: Venting, fauna, and carbonates. Science 231: 561-566.

- Kvenvolden, K.A. & M. Kastner, 1990. Gas hydrates of the Peruvian outer continental margin. In: E. Suess, R. von Huene, et al.; Proc. Ocean Drilling Program, Sci. Res. 112: 517-526.
- Lalli, C.M. & T.R. Parsons, 1993. Biological Oceanography. Pergamon Press, Oxford, New York, Seoul, Tokyo, 301 pp.c
- Lammers, S., 1994. Methane Cycling in the marine environment. Dissertation Universität Kiel, 99 pp.
- Le Pichon, X., K. Kobayashi & Kaiko-Nankai Scientific Crew, 1992. Fluid venting activity within the eastern Nankai Trough accretionary wedge: a summary of the 1989 Kaiko-Nankai results. Earth Planet Sci. Lett. 109: 303-318
- Le Pichon, X., P. Henry & S. Lallemant, 1993. Accretion and erosion in subduction zones: The role of fluids. Ann. Rev. Earth Planet. Sci. 21: 307-331.
- Lea, D.W. & E.A. Boyle, 1991. Barium in planctonic foraminifera. Geochim. Cosmochim. Acta 55: 3321-3331.
- Lewis, B.T.R. & G.C. Cochrane, 1990. Relationship between the location of chemosynthetic benthic communities and geologic structure on the Cascadia Subduction Zone. J. Geophys. Res. 95(B6): 8783-8793.
- Linke, P., M. Torres, V. Martens, W.D. Rugh, W. Ziebis & L.D. Kulm, 1994. *In situ* measurements of fluid flow from cold seeps at active continental margins. Deep-Sea Res. 41: 721-739.
- Lukashin, B.N., S.B. Galkin & A.J. Lein, 1990. Translated title: Chemical composition of deep-sea hydrothermal animals. Akad. Sci. UDSSR 550.47: 591.524.1(26): 279-286.
- Lutz, R.A., 1991/92. The biology of deep-sea vents and seeps. Oceanus 34(4): 75-83
- Lutz, R.A., L.W. Fritz & D.C. Rhoads, 1985. Molluscan growth at deep-sea hydrothermal vents. Biol. Soc. Wash. Bull. 6: 199-210.
- Lutz, R.A., L.W. Fritz & R.M. Cerrato, 1988. A comparison of bivalve (*Calypptogena magnifica*) growth at two deep-sea hydrothermal vents in the eastern Pacific. Deep-Sea Res., 35(10/11): 1793-1810.
- Mahlon, C., J.M. Kennicutt II, R.R. Brooks, R.R. Bidigare, R.R. Fay, T.L. Wade & T.J. McDonald, 1985. Vent-type taxa in a hydrocarbon seep region on the Louisiana slope. Nature 317: 351-353.
- Martin, J.B., J.M. Gieskes, M. Torres & M. Kastner, 1993. Bromine and iodine in Peru margin sediments and pore fluids: Implications for fluid origins. Geochim. Cosmochim. Acta 57: 4377-4389.
- McKay, M.E., G.F. Moore, G.R. Cochrane, J.C. Moore & L.D. Kulm, 1992. Landward vergence and oblique structural trends in the Oregon Margin accretionary prism: implications and effect of fluid flow. Earth Planet. Sci. Lett. 109: 477-491.
- McLean, J.H., 1985. Preliminary report on the limpets at hydrothermal vents. Biol. Soc. Wash. Bull. 6: 159-166.
- Moore J.C. & D. Orange, 1990. Interrelationship of fluid venting and structural evolution: Alvin observations from the frontal accretionary prism, Oregon. J. Geophys. Res. 95(B6): 8795-8808.

- Moore, J.C., 1991. Geophysicists meet bioherm. JOI/USSAC Newsletter 4: 1-3.
- Moore, J.C., K.M. Brown, F. Horath, G. Cochrane, M. MacKay & G. Moore, 1991. Plumbing accretionary prisms: effects of permeability variations. Phil. Trans. R. Soc. Lond. A 335: 275-288.
- Morse, J.W., 1986. The surface chemistry of calcium carbonate minerals in natural waters: an overview. Mar. Chem. 20: 91-112.
- Mutvei, H., 1979. On the internal structures of the nacreous tablets in molluscan shells. Scanning Electron Microscopy (II): 457-462.
- Mutvei, H., T. Westermark, E. Dunca, B. Carell, S. Forberg & A. Bignert, 1994. Methods of studies of environmental changes by using structural and chemical information in molluscan shells. Bulletin de l'Institut océanographique, Monaco, numéro spécial 13, in press
- Niitsuma N., Y. Matsushima, A. Fiala-Medioni & D. Hirata, 1989. Abyssal molluscan colony of *Calypptogena* in the Pliocene strata of the Miura Peninsula, central Japan. Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol. 71: 193-203.
- Okutani, T. & K. Egawa, 1989. The first underwater observation on living habitat and thanatocoenosis of *Calypptogena soyoe* in bathyal depth of Sagami Bay. Venus 44: 285-288.
- Otha, S. & L. Laubier, 1987. Deep biological communities in the subduction zone off Japan from bottom photographs taken during Nautilé dives in the "Kaiko" projekt. Earth. Planet. Sci. Lett. 83: 329-342.
- Parsons B., 1981. The rates of plate creation and consumption. Geophys. J. R. Astr. Soc. 67: 437-448.
- Paull, C.K., B. Hecker, R. Commeau, R.P. Freeman-Lynde, C. Neumann, W.P. Corso, S. Golubic, J.E. Hook, E. Sikes & J. Curray, 1984. Biological communities at the Florida Escarpment resemble hydrothermal vent taxa. Science 29: 965-967.
- Paull, C.P., J.P. Chanton, A.C. Neumann, J.A. Coston, C.S. Martens & W. Showers, 1992. Indicators of methane-derived carbonates and chemosynthetic organic carbon deposits: examples from the Florida Escarpment. Palaios 7: 361-375.
- Peacock, S.M., 1990. Fluid processes in subduction zones. Science 248: 321-337.
- Rhoads, D.C., R.A. Lutz, E.C. Revelas & R.M. Cerrato, 1981. Growth of bivalves of the deep-sea hydrothermal vents along the Galapagos Rift. Science 214: 911-913.
- Riddihough, R.P., 1984. Recent movements of the Juan de Fuca plate system. J. Geophys. Res. 89: 6980-6994.
- Rio, M., M. Roux, M. Renard & E. Schein, 1992. Chemical and isotopic features of present day bivalve shells from hydrothermal vents or cold seeps. Palaios 7: 351-360.
- Ritger, S., B. Carson & E. Suess, 1987. Methane-derived authigenic carbonates formed by subduction-induced pore-water expulsion along the Oregon/Washington margin. Geol. Soc. Am. Bull. 98: 147-156.

- Roesijadi, G. & E.A. Crecelius, 1984. Element composition of the hydrothermal vent clam *Calyptogena magnifica* from the East Pacific Rise. Mar. Biol. 83: 155-161.
- Romanek, C.S. & E.L. Grossmann, 1989. Stable isotope profiles of *Tridacna maxima* as environmental indicators. Palaios 4: 402-413.
- Rona, P.A., G. Klinkhammer, T.A. Nelsen, J.H. Trefry & H. Elderfield, 1986. Black smokers, massive sulphides and vent biota at the Mid-Atlantic Ridge. Nature 321: 33-37.
- Roux, M., M. Rio & E. Fatton, 1985. Clam growth and thermal spring activity recorded by shells at 21° N. In: M.L. Jones (ed.), The hydrothermal vents of the Eastern Pacific: An Overview. Biol. Soc. Wash. Bull. 6: 211-221.
- Ruby, E.G., H.W. Jannasch & W.G. Deuser, 1987. Fractionation of stable isotopes during chemoautotrophic growth of sulfur-oxidizing bacteria. Applied and Environmental Microbiology, 53: 1940-1944.
- Saino, T., A. Fiala-Medioni & S. Otha, 1989. ¹³C/¹²C and ¹⁵N/¹⁴N ratios of vesicomyid clams and a vestimentiferan tube worm in the subduction zone east of Japan. Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol. 71: 169-178.
- Schifano, G., A. Fiala-Medioni, 1984. Environmental, biological and mineralogical controls on strontium incorporation into skeletal carbonates in some gastropod intertidal species. Paleogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol. 46: 303-312.
- Schlüter, M. & P. Linke, 1993. Geochemistry and fluid flow observed at deep-sea boreholes (CORK) on the Cascadia Accretionary Wedge (ODP Sites 889 and 892). EOS 74: 578.
- Schmaljohann, R., E. Faber; M.J. Whithicar & P.R. Dando, 1990. Co-existence of methane- and sulfur-based endosymbioses between bacteria and invertebrates at a site in the Skagerrak. Mar. Ecol. Prog. Ser. 61: 119-124.
- Seire, A., B. Carell, T. Westermark, H. Mutvei & A. Bignert, 1994. Bivalve shells as environmental archives in brackish water: elemental and radioactivity studies of estonian *Macoma baltica* shells, 1994. Bulletin de l'Institut océanographique, Monaco, numéro spécial 13, in press
- Sibuet, M., S.K. Juniper & G. Pautot, 1988. Cold-seep benthic communities in the Japan subduction zones: geological control of community development. J. Mar. Res. 46: 333-348.
- Snavely, P.D. Jr. 1979. Tertiary geologic framework, neotectonics and petroleum potential of the Oregon-Washington continental margin. In: Scholl, D.W., A. Grantz & J.G. Vedders (eds.), Geology and Resource Potential of the Continental Margin of Western North America and Adjacent Ocean Basins-Beaufort Sea to Baja California. Circum-Pac. Counc. Energy Miner. Resourc.: 305-336.
- Southward, E.C., 1991. Three new species of Pogonophora, including two vestimentiferans, from hydrothermal vent sites in the Lau back-arc basin (Southwest Pacific Ocean). J. Nat. Hist. 25: 859-881.
- Spaargaren, D.H., 1991. The biological use of chemical elements: selection on environmental availability and electron configuration. Oceanol. Acta 14: 569-574.
- Stoffyn-Egli, P. & F.T. Mackenzie, 1984. Mass balance of dissolved lithium in the

oceans. Geochim. Cosmochim. Acta 48: 859-872.

ANHANG

Der Anhang umfaßt neben den verwendeten Meßprogrammen für die Graphitrohr-Atom Absorptions Spektrometrie (GF-AAS) Kurzbeschreibungen aller Proben, sowie ermittelte Daten. Der Anhang beinhaltet alle Daten, die im Verlaufe der vorliegenden Arbeit ermittelt wurden. Darunter fallen auch solche Ergebnisse, die im Text nicht ausdrücklich erwähnt werden, wohl aber für die Beurteilung eines Gebietes von Bedeutung sind. Die vollständige Präsentation, auch nicht speziell diskutierten, Datenmaterials soll als Grundlage für weiterführende Untersuchungen dienlich sein.

Anmerkungen zum Datenanhang

Alle vorgestellten Meßergebnisse, die als Verhältniszahl zu Calcium aufgeführt sind (Ba/Ca, Cu/Ca ...) entsprechen Angaben in μmol des entsprechenden Elements pro Mol Calcium. Ausnahmen sind * mmol/Mol und + nmol/Mol. Angaben in ppm beziehen sich auf die Trockeneinwaage der entsprechenden Probe.

Isotopenwerte ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$) beschreiben die Abweichung einer Probe vom PDB Standard in ‰. Dabei wird das Verhältnis von ^{16}O zu ^{18}O bzw. ^{12}C zu ^{13}C berücksichtigt.

Die Längenangabe in mm bezieht sich auf die Distanz der entnommenen Probe zum rezenten Ende der Schale/Röhre eines Organismus. D.h. die Angabe beschreibt die Entfernung von Schalenrand bzw. der Röhrenöffnung.

In einigen Fällen wurden die Proben durchnummeriert. Bei Serpuliden repräsentieren alle Proben etwa gleich große Röhrenabschnitte; die Bruchstücke wurden durchgängig beprobt, eine Orientierung ist jedoch nicht möglich. Alle übrigen Proben sind dann nummeriert, wenn die Längenabschnitte nicht bekannt waren, also die Proben nicht selbst entnommen wurden (Schalen), oder alle Proben gleichwertig sind (Konkretion).

1 Meßprogramme

Element: Barium

Step	Temp.	Ramp	Hold	Int. Flow	Read
1	110	1	30	250	
2	130	10	35	250	
3	1100	20	20	250	
4	2400	0	6	0	x
5	2600	1	3	250	
6	1300	1	3	250	
7	2600	1	3	250	

Matrix-Modifier: -

Element: Lithium

Step	Temp.	Ramp	Hold	Int. Flow	Read
1	110	1	20	250	
2	130	5	30	250	
3	900	10	20	250	
4	2200	0	5	0	x
5	2400	5	5	250	
6	1300	10	5	250	
7	2400	1	5	250	

Matrix-Modifier: -

Element: Kupfer (Cu)

Step	Temp.	Ramp	Hold	Int. Flow	Read
1	120	5	30	250	
2	140	1	40	250	
3	800	5	20	250	
4	1900	0	5	0	x
5	2400	1	2	250	

Matrix-Modifier: $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 + \text{Pd}$

Element: Zink (Zn)

Step	Temp.	Ramp	Hold	Int. Flow	Read
1	120	5	30	250	
2	130	1	40	250	
3	600	5	20	250	
4	1800	0	3	0	x
5	2400	1	2	250	

Matrix-Modifier: Mg (NO₃)₂

Element: Blei (Pb)

Step	Temp.	Ramp	Hold	Int. Flow	Read
1	110	1	20	250	
2	130	5	30	250	
3	850	10	20	250	
4	1800	0	5	0	x

Matrix-Modifier: Mg (NO₃)₂

Element: Cadmium (Cd)

Step	Temp.	Ramp	Hold	Int. Flow	Read
1	110	1	20	250	
2	150	2	55	250	
3	900	20	30	250	
4	1600	0	3	0	x
5	2400	1	5	250	

Matrix-Modifier: Mg (NO₃)₂ + PO₄

2 Kurzbeschreibungen der Proben

A. OREGON

I. Marginal Ridge

1428 *Calyptogena*:

Von diesem Organismus sind nur die bearbeiteten Proben, in aufgeschlossener Form, vorhanden. Sie wurden aus einem Bruchstück der Schale ausgebohrt. Größe des Bruchstücks ca. 5x14 cm (L x B) groß.

Bergung des Organismus: 1984

1428 *L. barhami*

Großes Knäuel einer bei Bergung lebendigen Kolonie. Individuen für Weichteilbeprobung wurden durchnummeriert, einige dieser Röhren für die geochemische Analytik verwendet.

Bergung der Kolonie: 1984

1428 Konkretion

Die so bezeichneten Proben entsprechen einer carbonatischen Krustenbildung, die auf dem Sediment lag. Aufgrund der Bergungstechnik ist eine Orientierung des Gesteins zur gezielten Beprobung nicht möglich. Entnommene Proben können daher keine zeitliche Abfolge dokumentieren.

Bergung der Konkretion: 1984

1432 *Solemya*:

Die Schalen dieses Organismus sind ebenfalls nicht mehr vorhanden. Es sind lediglich einige Isotopendaten bekannt.

Bergung des Organismus: 1984

1907 *Calyptogena*:

Die Schalenproben dieses Organismus wurden aus einem Bruchstück ausgesägt. Die gesamten Schalen hatten eine Größe von 12x26 cm.

Bergung des Organismus: 1987

2656 *Calypptogena*

Vollständiger Organismus; Größe 10x17 cm. Beprobung von Schale und Weichteilen.

Bergung des Organismus: 1993

2656 *L. barhami*

Lebendig geborgene Kolonie, von der vorerst ein Individuum zur geochemischen Analytik verwendet wurde.

Bergung der Kolonie: 1993

2658-1 *Calypptogena*

Vollständiger Organismus; Größe 9x21 cm. Beprobung von Schale und Weichteilen.

Bergung des Organismus: 1993

2658-2 *Calypptogena*

Vollständiger Organismus; Größe 9x20 cm. Beprobung von Schale und Weichteilen.

Bergung des Organismus: 1993

II. Second Ridge

2046 *Calypptogena* 1

Die Schalen haben eine Größe von 12x24 cm. Eine Klappe liegt in Bruchstücken vor, die andere ist vollständig und wurde bearbeitet.

Bergung des Organismus: 1988

2046 *Calypptogena* 2

Vollständiger Organismus. Weichteile wurden beprobt. Größe 8.5x20 cm.

Bergung des Organismus: 1988

2663 *Calypptogena*

Vollständiger Organismus; Größe 10x23 cm. Beprobung von Schale und Weichteilen.

Bergung des Organismus: 1993

2663 *L. barhami*

Lebendig geborgene Kolonie, von der vorerst ein Individuum zur geochemischen Analytik verwendet wurde.

Bergung der Kolonie: 1993

III. Bioherm

2283 *Calypptogena*

An der Lokation 2283 wurde ein ganzes *Calypptogena*-Nest geborgen. Die Individuen gehörten zwei Größenklassen an.

a) ca. 4x8 cm -> *Calypptogena* 2283-4

b) ca 2.3x3.5 cm -> *Calypptogena* 2283-8

Von jeder Größenklasse wurde eine Schale bearbeitet, die Weichteile sind von insgesamt 12 Organismen präpariert worden.

Bergung der Organismen: 1990

B. PERU

I. Chiclayo

33 *Calypptogena*

Der Organismus lag vollständig gefroren vor, die Schale war jedoch in viele Einzelteile zerbrochen. Durch wahrscheinlich mehrfaches Auftauen und Einfrieren waren die Weichteile sehr schlecht differenzierbar. Sie sind, soweit möglich, präpariert. Die Schalenproben wurden aus mehreren Bruchstücken über ein Profil ausgesägt. Die gesamte Schale hat eine Größe von ca. 7x15 cm.

Bergung des Organismus: 1991

33 Serpuliden

An dieser Lokation sind einige Bruchstücke von Serpulidenröhren geborgen worden. Die Längsten wurden zur Bearbeitung ausgewählt. Sie haben eine Länge von 6 bzw. 7 cm. Es handelt sich weder um Anfangs- noch um Endstücke, eine Orientierung ist nicht möglich.

Bergung der Röhren: 1991

II. Paita

30 *Calypptogena*

Zerbrochener Organismus, von dem ein Bruchstück beprobt wurde. Größe des Gesamtorganismus ca. 6x11 cm.

Bergung des Organismus: 1991

30 Serpulide

Bruchstück einer Serpulidenröhre von ca. 6 cm Länge. Es handelt sich weder um Anfangs- noch um Endstücke, eine Orientierung ist nicht möglich.

Bergung der Röhre: 1991

177 *Calypptogena* 1

Vollständige einzelne Schale aus Dredgefahrt. Daher nicht genau zu lokalisieren.

Größe 4.5x11 cm.

Bergung der Schale: 1992

177 *Calypptogena* 2

Schalenbruchstück aus Dredgefahrt. Daher nicht genau zu lokalisieren. Größe des Gesamtorganismus ca. 7x13 cm.

Bergung der Schale: 1992

177 *Solemya* 1

Vollständige einzelne Schale aus Dredgefahrt. Daher nicht genau zu lokalisieren.

Größe 7x14 cm.

Bergung der Schale: 1992

177 *Solemya* 2

Vollständige einzelne Schale aus Dredgefahrt. Daher nicht genau zu lokalisieren.

Größe 4.5x10 cm.

Bergung der Schale: 1992

III. Chimbote

8506 *Calypptogena* 1

Bruchstück einer Schale aus Dredgefahrt. Daher nicht genau zu lokalisieren.

Größe des Bruchstücks 7x8 cm.

Bergung des Organismus: 1991

8506 *Calypptogena* 2

Vollständige einzelne Schale aus Dredgefahrt. Daher nicht genau zu lokalisieren.

Größe 9x20 cm.

Bergung des Organismus: 1991

163 *Solemya* 1

Vollständige einzelne Schale aus Dredgefahrt. Daher nicht genau zu lokalisieren.

Größe 4.5x8 cm.

Bergung der Schale: 1992

163 *Solemya* 2

Vollständige einzelne Schale aus Dredgefahrt. Daher nicht genau zu lokalisieren.

Größe 6x10.5 cm.

Bergung der Schale: 1992

163 Serpulide

Bruchstück einer Serpulidenröhre. Es handelt sich weder um Anfangs- noch um Endstücke, eine Orientierung ist nicht möglich. Länge 5 cm.

Bergung des Bruchstückes: 1992

3 Datenanhang

A. OREGON

I. Marginal Ridge

1428 *Calypptogena*

	mm	Sr/Ca*	Mg/Ca*	Ba/Ca	Li/Ca	Cu/Ca	Zn/Ca	Pb/Ca+	Cd/Ca+	Be/Ca	Co/Ca
1	1.5	64.8	27.2	313	1.05	1.33	1.61	1.82	25.7	0.0119	0.140
2	3.7	75.9	23.1	4.70	0.895	1.01	0.625	1.49	39.3	0.0818	0.102
3	5.8	69.0	30.5	86.1	0.975	0.591	0.326	3.97	11.0	0.100	0.0670
4	8.1	68.8	27.0	1.60	0.860	0.748	0.592	1.54	9.84	0.0368	0.0807
5	10	70.0	27.7	31.2	0.838	0.892	0.346	2.09	28.8	0.0598	0.0494
6	12	55.2	29.8	0.858	0.795	0.327	0.159	1.81	28.9	0.0240	0.0697
7	14	84.3	25.3	8.45	0.791	0.555	0.166	3.04	16.9	0.0703	0.0645
8	18	80.8	23.6	0.538	0.675	0.300	0.320	2.13	0.00	0.0332	0.0575
9	18	86.3	23.5	11.7	0.855	0.894	0.365	1.87	1.02	0.0886	0.0774
10	21	74.4	27.3	0.313	0.737	1.90	0.245	1.77	0.00	0.272	0.0723
11	23	71.0	28.3	3.13	0.709	1.42	0.482	2.48	55.9	0.186	0.0462
12	26	76.1	24.7	0.414	0.814	1.61	0.386	3.24	9.31	0.0929	0.0764
13	28	74.3	22.8	1.49	0.760	1.80	0.486	2.32	28.7	0.263	0.0712
14	30	69.9	28.8	0.481	0.792	1.89	0.453	3.61	39.9	0.299	0.0705
15	32	72.3	29.3	1.59	0.973	0.308	0.00	3.65	5.09	0.0381	0.0718
16	35	67.3	32.6	0.297	0.768	0.678	2.88	5.13	0.968	0.0121	0.0720
17	37	72.6	27.8	1.43	0.851	0.441	0.397	5.79	5.84	0.121	0.0743
18	40	63.6	25.6	0.387	0.827	0.497	0.00	7.38	0.00	0.0825	0.0631
19	42	67.0	25.7	1.97	0.762	0.483	0.00	8.85	0.00	0.00	0.0652
20	45	77.5	29.3	0.404	0.908	0.635	0.156	19.0	31.9	0.0724	0.0738
21	49	87.1	36.6	13.2	0.826	0.487	0.0877	37.4	7.84	0.0856	0.0804

	mm	∂ 13C I	∂ 18O I	∂ 13C A	∂ 18O A
1	4.0	0.230	3.91	1.14	4.23
2	7.0	0.0700	3.80	0.830	4.40
3	10	-0.160	3.89	0.920	4.15
4	14	-0.320	4.02	0.970	4.13
5	17	-0.400	3.85	0.850	4.29
6	19	-0.870	3.94	0.630	4.17
7	23	-1.46	3.61	0.470	4.32
8	26	-1.53	3.48	0.250	4.20
9	30	-2.72	3.23	0.0900	4.33
10	32	-3.76	2.89	0.160	4.37
11	35	-4.49	2.54	0.160	4.03
12	39	-5.27	2.41	0.350	4.01
13	41	-5.52	2.33	0.00	4.12
14	44	-6.50	2.04	-0.0300	4.08
15	47	-6.82	2.05	-0.100	4.04
16	49	-6.25	2.22	-0.370	4.03

	mm	Ba ppm	Cu ppm	Zn ppm	Pb ppm	Cd ppm
1	5.00	7.85	62.4		0.00	6.85
2	12.0	32.8	70.9	5.79	12.2	
3	18.0	24.6	44.4		7.10	1.79
4	28.0	18.0	52.6	7.14	13.4	
5	34.0	0.0669	27.5		0.0246	1.64
6	39.0	3.28	44.3	10.0	1.75	
7	42.0	2.93	26.2		3.51	1.99
8	46.0	3.96	57.6	15.9	1.80	
9	49.0	2.22	22.5		2.90	2.52
10	52.0	0.00	39.2	15.4	0.313	
11	56.0	2.31	21.2		2.26	2.61
12	61.0	21.2	69.9	11.0	3.29	
13	66.0	6.46	24.3		5.26	2.24
14	72.0	9.00	60.8	9.02	1.54	
15	75.0	5.12	36.8		2.32	1.94
16	78.0	4.85	41.2	17.8	0.548	
17	81.0	1.04	20.3		1.44	1.38
18	84.0	0.605	47.1	21.1	0.422	
19	87.0	0.619	26.0		1.60	1.34
20	91.0	18.8	82.4	20.1	2.54	
21	94.0	14.3	30.1		1.59	0.963
22	96.0	10.5	48.6	15.6	0.991	
23	102	1.77	43.5	23.4	0.547	
24	105	1.65	38.3		1.05	1.38
25	108	5.12	48.6	15.3	0.801	
26	111	4.68	28.2		0.912	0.864
27	113	4.33	71.8	25.8	0.368	
28	117	0.00	23.0		1.72	0.494
29	123	5.77	52.1	15.2	0.00	
30	127	10.1	33.6		4.18	1.01
31	131	3.33	45.4	17.7	0.547	
32	136	10.6	27.4		2.44	2.32
33	140	34.1	68.9	24.5	1.85	
34	144	5.98	10.1		2.99	0.611
35	147	32.3	64.3	27.0		
36	151	2.72				0.379
37	161	18.9				1.65
38	165	1.41	34.8	21.2		
39	168	3.51				0.766
40	173	5.06	38.2	19.8		
41	177	3.22				1.34
42	182	0.00	36.0	26.5		
43	186	3.96				0.962
44	190	0.972	17.3	26.4		
45	193	5.64				1.91
46	196	1.25	13.5	26.7		
47	200	4.29				7.95
48	204					
49	207	9.56				4.64
50	211	1.09	11.9			

	mm	Ba ppm	Cu ppm	Zn ppm	Pb ppm	Cd ppm
51	214	8.58				19.0
52	217	0.00	13.3	33.1		
53	220	4.13		35.3		3.63
54	224		14.1	26.1	0.443	
55	227				0.840	2.92
56	230		13.5	20.2	0.706	
57	238		27.7	43.2	0.487	
58	242		10.5	24.2	1.44	
59	245		18.6	34.3	0.821	
60	250		18.3	35.1	1.78	
61	253		38.8	55.2	0.611	
62	256		17.4	45.4	0.668	
63	259		13.3	43.4	0.633	
64	262			48.4	0.340	1.18
65	265		33.2	68.0	0.451	
66	268	0.455	22.2	42.8	0.432	10.9
67	271		29.7	40.3	0.696	
68	274		24.2	52.4		
69	278	46.4	15.7	50.4		40.5
70	282	37.9	18.6	41.0		33.1
71	286	45.2	28.7	48.1		
72	290	47.8	23.8	54.8		
73	294	38.1	23.9	50.5		
74	297	44.8	17.6	51.3		
75	300	39.2	26.0	47.6		
76	304	37.2	13.8	42.0		
77	307	50.3	29.6	51.4		
78	311	42.8	20.9	42.2		
79	315	49.6	18.6	44.5		
80	319	40.9	25.5	42.7		
81	322	44.2	20.3	46.7		
82	326	42.3	29.6	48.8		36.9
83	329		19.9	37.8		0.00
84	334	13.3	39.1	43.5		
85	338			45.6		29.5
86	342			43.4		36.7
87	346		45.5	33.4		0.00
88	351		31.2	36.4		
89	353		44.6			
90	357		27.0	41.7		
91	360		27.6	33.6		
92	364			43.8		
93	369			40.7		
94	377			30.0		

1428 *L. barhami* 14

	mm	Cu ppm	Zn ppm
1	5.00	23.0	94.2
2	14.0	48.7	192
3	21.0	21.4	27.5
4	25.0	19.2	26.9
5	29.0	16.3	32.8
6	34.0	17.2	56.5
7	39.0	9.59	49.6
8	44.0	7.11	40.4
9	50.0	18.0	116
10	55.0	16.2	41.4
11	62.0	11.5	30.8
12	69.0	12.6	32.5
13	75.0	12.7	35.4
14	81.0	17.2	33.3
15	86.0	20.5	36.4

1428 *L. barhami* 24

	mm	Cu ppm	Zn ppm
1	4.00	18.1	104
2	10.0	21.5	65.8
3	14.0	12.9	35.7
4	18.0	12.4	39.5
5	23.0	14.4	38.6
6	28.0	16.1	48.8
7	33.0	18.6	42.3
8	38.0	12.4	31.7
9	43.0	13.7	27.1
10	49.0	11.7	25.8
11	55.0	12.3	
12	61.0	13.3	
13	67.0	14.2	
14	75.0	16.4	
15	81.0	8.84	

1428 Konkretion

	Probe Nr.	Ba/Ca	Li/Ca
1	162	554	0.00
2	163	539	77.2
3	164	639	86.5
4	165	608	100.0
5	166	651	104
6	167	633	118
7	168	690	90.1
8	169	572	95.9
9	170	639	100
10	171	545	85.8
11	172	616	88.6
12	173	646	118
13	174	656	90.0
14	175	474	132
15	176	496	86.3
16	177	639	99.9

1432 Solemya

	mm	δ 13C	δ 18O
1	3.0	0.500	3.65
2	6.0	0.630	3.74
3	8.0	0.740	3.77
4	10	0.980	3.93
5	12	1.14	3.91
6	14	1.16	3.89
7	16	1.27	3.96
8	19	1.31	3.94
9	21	1.47	4.05
10	23	1.56	4.12
11	25	1.61	4.12
12	26	1.67	4.10
13	29	1.82	4.16
14	31	1.92	4.15
15	33	1.95	4.11
16	35	2.11	4.26
17	37	1.97	4.20
18	39	1.91	4.16
19	41	1.85	4.18
20	43	1.41	4.01

1907 *Calypptogena*

	mm	Sr/Ca*	Ba/Ca	Li/Ca	Cu/Ca	Zn/Ca
1	62	1.76	1.35	3.05	0.321	1.34
2	57	1.71	2.17	3.17	0.314	0.785
3	53	1.50	2.49	3.13	0.344	0.954
4	48	1.51	2.07	3.01	0.330	2.62
5	43	1.48	2.12	3.30	0.431	2.56
6	38	3.12	5.52	6.17	0.935	0.491
7	30	1.39	1.33	3.49	0.568	3.96
8	24	2.47	3.36	6.66	0.732	0.759
9	17	2.06	2.45	6.30	0.803	0.322
10	11	1.64	1.83	4.45	0.942	0.438
11	6.0	1.25	0.921	2.79	0.552	0.498
12	2.0	1.19	0.943	2.21	0.887	0.429

	mm	δ 13C	δ 18O
1	1.0	1.57	4.11
2	2.0	1.69	4.25
3	3.0	1.63	4.29
4	4.0	1.57	4.28
5	5.0	1.61	4.27
6	6.0	1.72	4.18
7	7.0	1.92	4.46
8	8.0	1.80	4.49
9	9.0	1.88	4.20
10	10	1.90	4.36
11	11	1.95	4.56
12	12	1.93	4.35
13	13	1.99	4.27
14	14	2.01	4.64
15	15	1.97	4.35
16	16	1.94	4.28
17	17	1.90	4.38
18	18	1.49	4.35
19	19	1.02	4.01
20	20	0.880	4.03

	mm	Sr/Ca*	Ba/Ca	Li/Ca	Cu/Ca	Zn/Ca
1	3.0	1.41	10.6	3.73	3.84	30.3
2	6.0	1.25	13.6	5.52	1.15	2.15
3	10	1.21	16.3	12.3	0.512	
4	13	1.18	12.0	8.30	0.0849	0.904
5	18	1.19	14.3	7.02	0.795	3.59
6	22	1.29	15.2	6.81	0.640	6.87
7	26	1.28	14.5	6.48	0.485	5.04
8	30	1.32	16.4	5.61	0.541	8.14
9	33	1.45	13.9	4.10	1.24	6.33
10	39	1.52	11.0	1.77	0.847	8.03
11	43	1.46	9.85	2.47	0.513	5.20
12	48	1.52	13.5	2.65	0.325	9.26
13	51	1.62	17.1	3.07	0.179	10.5
14	56	1.76	15.7	2.78	0.846	6.60
15	59	1.66	14.7	3.44	0.00	6.76
16	62	1.55	11.7	2.63	0.0956	7.95
17	70	1.56	15.5	1.22	0.802	11.2
18	76	1.29	16.5	1.02	2.12	10.1
19	82	1.20	9.90	2.69	1.50	29.4
20	87	1.07	11.0	1.29	3.07	10.9
21	92	1.06	11.3	0.887	0.208	5.86

	mm	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{18}\text{O}$
1	2.0	0.510	3.81
2	4.0	-0.890	2.56
3	6.0	-0.840	3.48
4	8.0	-1.16	3.04
5	10	-0.950	1.61
6	12	0.100	3.32
7	14	-0.130	3.25
8	16	-0.100	2.91
9	18	-0.100	2.76
10	20	0.420	3.33
11	22	-0.650	1.02
12	24	-0.01000	3.71
13	26	-0.0200	2.36
14	28	0.520	3.16
15	30	0.590	2.54
16	32	0.0700	2.01
17	34	0.290	3.00
18	36	0.330	2.71
19	38	0.320	3.11
20	40	0.800	3.32
21	42	0.180	2.57
22	44	0.310	2.42
23	46	1.12	2.73
24	48	0.950	3.23
25	50	-0.220	2.47
26	52	0.370	2.64
27	54	-0.110	0.840

	mm	Cu ppm	Zn ppm
1	4.00	52.9	15.1
2	9.00	24.3	16.5
3	14.0	11.8	8.41
4	18.0	19.0	7.74
5	23.0	5.85	6.24
6	28.0	6.13	5.99
7	33.0	13.1	8.31
8	38.0	9.19	6.01
9	43.0	6.39	5.76
10	48.0	11.2	4.52
11	54.0	4.71	3.91
12	59.0	20.7	8.95
13	64.0	10.7	6.38
14	68.0	14.4	6.83
15	74.0	7.03	4.55
16	80.0	6.39	4.24
17	86.0	4.37	6.89
18	90.0	9.18	7.74
19	93.0	20.8	9.14
20	98.0	8.77	8.35
21	104	8.57	5.44
22	107	40.0	14.2
23	112	11.5	8.29
24	118	10.8	9.47
25	122	30.4	12.8
26	126	46.4	8.08
27	130	20.4	7.46
28	134	20.9	8.06
29	139	11.6	4.35
30	144	19.8	5.62
31	149	24.3	13.3
32	155	16.6	16.3
33	161	18.5	10.7
34	167	18.4	14.8
35	173	14.1	14.0
36	178	10.4	12.1
37	183	29.3	15.3
38	188	9.66	10.1
39	193	9.67	10.9
40	199	7.33	12.9
41	204	9.44	13.6
42	209	32.2	14.5
43	214	38.1	13.5
44	219	17.1	15.7
45	224	10.1	13.3
46	229	7.37	8.66
47	234	25.3	12.0
48	239	17.3	8.37
49	245	22.5	11.4
50	252	9.86	9.93

2658-1 *Calypptogena*

	mm	Sr/Ca*	Ba/Ca	Li/Ca	Cu/Ca	Zn/Ca
1	1.0	2.00	7.53	27.8	7.74	9.23
2	3.0	1.50	9.65	24.3	5.57	11.1
3	5.0	1.44	10.9	34.4	1.30	3.60
4	8.0	1.33	14.4	7.88	0.317	0.325
5	10	1.40	17.2	4.01	2.24	1.56
6	14	1.27	12.4	1.17	0.0979	0.604
7	17	1.28	10.3	5.56	0.338	0.680
8	21	1.36	22.6	4.27	0.507	0.434
9	25	1.38	10.4	3.10	0.782	0.737
10	27	1.38	11.2	3.42	1.55	1.33
11	31	1.36	7.33	4.82	0.673	0.950
12	34	1.50	9.77	6.39	0.00	0.868
13	36	1.62	11.0	14.2	0.815	2.98
14	39	1.48	12.3	0.747	0.376	0.914
15	42	1.66	14.1	0.769	0.369	0.540
16	46	1.65	11.5	2.32	0.670	0.446
17	51	1.63	12.3	1.57	0.852	0.757
18	55	1.63	10.8	1.87	1.15	1.66
19	60	1.46	8.65	2.60	0.717	1.68
20	64	1.47	6.90	3.64	0.561	1.86
21	67	1.41	5.75	2.87	0.00	2.80
22	71	1.15	3.87	1.96	0.00	5.17
23	74	1.18	4.83	0.883	0.00	4.28
24	76	1.08	4.39	1.16	0.00	9.05

2658-2 *Calypptogena*

	mm	Sr/Ca*	Ba/Ca	Li/Ca	Cu/Ca	Zn/Ca
1	2.0	1.61	9.03	1.32	9.62	5.06
2	7.0	1.45	10.4	2.63	5.72	2.34
3	10	1.36	8.88	2.05	1.66	0.570
4	14	1.41	6.65	11.4	0.939	1.74
5	17	0.0780	9.67	23.0	0.754	1.77
6	22	1.69	8.34	24.6	0.648	1.05
7	25	1.48	10.2	12.6	1.12	1.59
8	30	1.53	15.3	15.6	1.65	1.14
9	33	1.58	7.20	11.5	1.83	1.15
10	37	1.67	10.0	13.3	1.98	3.27
11	42	1.56	5.06	10.8	2.63	4.66
12	48	1.75	12.6	14.6	2.47	1.95
13	52	1.71	5.74	4.28	2.13	3.01
14	57	1.45	2.71	60.9	1.87	8.89
15	62	1.50	9.29	34.6	1.60	1.48
16	67	1.46	8.46	17.0	2.02	3.37
17	74	1.22	6.83	28.1	1.30	2.70
18	78	1.18	4.60	6.81	1.02	3.16
19	83	1.17	3.70	1.66	0.993	3.27

II. Second Ridge

2046 *Calypptogena* 1

	mm	Sr/Ca	Ba/Ca	Li/Ca	Cu/Ca	Zn/Ca
1	5.0	0.140	1.69	0.967	0.0570	0.0431
2	10	0.373	1.59	2.20	0.354	0.0866
3	17	1.39	2.60	8.88	0.137	0.323
4	22	7.70	1.82	44.3	0.733	1.99
5	30	0.169	2.10	0.812	0.0196	0.102
6	33	0.0914	2.38	0.214	0.103	0.129
7	36	0.221	6.67	0.865	0.00982	0.0748
8	39	3.96	1.53	11.9	2.88	3.21
9	42	0.662	1.90	1.48	0.521	0.867
10	46	2.15	1.88	8.14	3.28	0.660
11	49	0.362	3.25	1.84	0.188	
12	52	0.380	2.84	1.79	0.168	0.979

2046 *Calypptogena* 2 Außenschale

	mm	Sr/Ca*	Ba/Ca	Li/Ca	Cu/Ca	Zn/Ca
1	2.0	1.43	5.26	0.749	2.92	1.84
2	5.0	1.45	3.19	0.698	1.19	0.264
3	8.0	1.42	1.49	0.685	0.648	0.279
4	12	1.33	0.892	0.621	0.714	0.236
5	16	1.90	5.71	0.692	0.216	0.00
6	28	1.80	3.63	0.704	0.262	1.07
7	32	1.77	3.00	0.445	0.164	0.916
8	35	1.54	4.52		0.625	0.917
9	40					
10	45	1.85	3.13	0.634	0.934	5.67
11	50	2.12	5.14	0.776	0.689	5.32
12	55	1.81	2.49	0.681	1.57	8.10
13	61	2.13	4.05	0.738	1.26	9.97
14	70	1.20	7.52	0.0858	0.00	7.08
15	73	1.01	0.00	0.00	0.00	17.3
16	77	1.10	0.00	0.00	1.12	9.99

	mm	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{18}\text{O}$
1	3.0	0.860	4.09
2	5.0	0.690	3.83
3	7.0	0.400	4.02
4	13	0.590	3.68
5	16	0.450	3.86
6	19	0.230	3.73
7	21	0.420	3.86
8	23	-0.0400	3.91
9	27	0.860	3.96
10	29	0.610	3.95
11	32	0.840	3.89
12	34	0.870	3.73
13	36	0.920	3.93
14	38	1.26	3.94
15	40	1.24	3.93
16	42	0.350	3.86
17	44	0.700	3.87
18	47	1.50	3.93
19	48	0.670	3.94
20	50	0.600	3.41
21	53	0.450	3.83
22	56	0.370	3.47
23	60	0.340	3.49
24	63	0.320	3.54
25	66		
26	70	-0.720	3.87
27	73	-1.20	2.39
28	76	-0.170	3.13
29	80	0.160	2.86
30	82	-0.160	2.97
31	85	0.410	3.40

2046 *Calypptogena* 2 Innenschale

	mm	Sr/Ca*	Ba/Ca	Li/Ca	Cu/Ca	Zn/Ca
1	5.0	1.01	26.8	18.2	1.94	22.8
2	12	1.04	0.00	4.83	0.945	4.61
3	16	1.69	0.00	16.6	2.71	13.8
4	50	1.70	12.4	11.8	2.14	7.08
5	55	1.42	0.00	5.26	1.34	4.84
6	64	1.30	0.00	10.2	2.04	9.13
7	67	1.09	14.2	27.3	2.80	12.2
8	73	1.07	16.0	32.7	3.95	25.4
9	77	1.04	0.00	5.03	0.940	3.02
10	82	1.08	11.4	3.62	1.21	11.5
11	86	0.978	6.00	2.80	0.204	1.30

	mm	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{18}\text{O}$
1	3.0	0.0700	3.13
2	6.0	0.420	2.75
3	14	0.400	3.85
4	21	-1.13	3.03
5	25	-0.790	3.46

2663 *Calypptogena*

	mm	Sr/Ca*	Ba/Ca	Li/Ca	Cu/Ca	Zn/Ca
1	3.0	0.656	1.72	2.41	0.753	
2	7.0	0.245	0.444	0.709	0.155	
3	10	0.249	0.773	1.13	0.120	1.44
4	15	0.273	0.726	1.64	0.161	0.191
5	19	0.169	0.437	0.827	0.0667	0.108
6	23	0.115	0.414	0.449	0.0313	0.290
7	27	0.0933	0.271	0.257	0.0250	0.134
8	30	0.0630	0.156	0.142	0.0168	0.0899
9	34	0.0753	0.168	0.190	0.0208	0.0440
10	38	0.0683	0.131	0.182	0.0151	0.0616
11	42	0.0597	0.181	0.146	0.00	0.0726
12	46	0.0416	0.0975	0.0678	0.00878	0.0616
13	50	0.0485	0.106	0.0970	0.0254	0.0797
14	54	0.0288	0.0624	0.0396	0.0192	0.0320
15	59	0.0262	0.0614	0.0215	0.00930	0.0669
16	64	0.0169	0.0373	0.00722	0.00788	0.0557
17	70	0.00820	0.0197	0.00660	0.0104	0.0348
18	75	0.0170	0.0409	0.0115	0.00597	0.0946
19	80	0.0109	0.0302	0.00	0.00229	0.0166
20	83	0.00603	0.0104	0.00	0.00114	0.0304
21	87	0.0156	0.0284	0.00	0.00334	0.0251

	mm	$\partial 13C$	$\partial 18O$
1	1.0	-1.00	3.64
2	3.0	-0.810	4.01
3	5.0	-0.870	3.78
4	9.0	-1.06	3.29
5	10	-1.45	3.51
6	12	-1.41	3.63
7	15	-1.93	3.53
8	18	-1.04	3.83
9	20	-1.47	3.68
10	23	-0.880	3.67
11	26	-1.21	2.43
12	29	-0.470	3.80
13	32	-0.440	3.64
14	35	-0.380	3.51
15	38	-0.510	3.63
16	41	-0.490	3.56
17	43	-0.150	3.55
18	45	0.140	3.74
19	48	0.330	3.57
20	51	0.270	3.68
21	53	0.320	3.65
22	56	0.560	3.00
23	60	0.190	3.30
24	64	0.120	3.08
25	67	0.680	3.04
26	72	0.490	3.25
27	75	0.320	2.98
28	80	-0.120	2.99
29	83	-1.92	2.34
30	86	-3.05	2.25
31	88	-1.74	2.69

	mm	Cu ppm	Zn ppm
1	5.00	47.2	17.9
2	10.0	42.4	12.5
3	14.0	36.5	7.24
4	19.0	27.1	8.15
5	25.0	30.1	4.84
6	27.0	27.1	5.69
7	30.0	23.7	9.53
8	35.0	17.2	6.20
9	39.0	17.8	6.62
10	43.0	20.2	6.29
11	47.0	23.2	8.01
12	51.0	22.8	6.20
13	56.0	22.1	5.58
14	61.0	18.7	6.77
15	65.0	24.6	5.60
16	70.0	21.0	8.99
17	75.0	20.2	8.54
18	80.0	25.4	9.42
19	85.0	25.0	5.80
20	90.0	18.4	3.68
21	95.0	15.1	9.80
22	99.0	21.4	8.45
23	103	17.8	7.55
24	108	13.9	3.96
25	112	14.7	6.17
26	115	16.1	5.38
27	120	18.3	4.95
28	125	15.4	6.24
29	129	14.4	8.47
30	133	14.1	7.15
31	137	14.3	6.13
32	142	12.0	6.40
33	146	12.8	7.21
34	152	12.6	9.09
35	156	9.31	14.7
36	159	11.7	
37	163	12.6	14.5
38	167	11.6	9.88
39	171	15.3	9.27
40	176	13.9	11.2
41	180	12.7	6.48
42	185	16.1	8.13
43	190	15.8	6.20
44	196	15.7	6.93
45	201	12.8	7.07
46	205	12.5	9.06
47	210	14.6	7.13
48	214	14.5	5.08
49	219		7.32
50	222		5.55

III. Bioherm

2283 *Calypptogena* 4 Außenschale

	mm	Sr/Ca*	Ba/Ca	Li	Cu/Ca	Zn/Ca
1	36	1.37	0.00	n.d.	2.54	2.86
2	33	3.05	0.00		8.75	37.6
3	30	1.19	8.84		2.52	24.7
4	27	3.54	0.00		1.51	14.9
5	24	1.27	15.0		0.618	1.20
6	19	1.23	5.90		0.421	0.608
7	15	1.19	0.00		0.883	4.78
8	12	1.10	8.16		0.229	1.77
9	9.0	1.03	2.70		0.239	0.630
10	5.0	1.00	0.00		0.387	14.0
11	3.0	1.43	0.00		5.24	3.34

2283 *Calypptogena* 4 Innenschale

	mm	Sr/Ca*	Ba/Ca	Li	Cu/Ca	Zn/Ca
1	36	1.35	0.00	n.d.	0.411	0.591
2	33	1.66	0.00		0.570	0.471
3	30	2.66	0.00		0.00	5.12
4	27	2.08	11.4		0.312	22.9
5	24	1.36	0.00		1.94	9.63
6	19	1.27	10.6		0.485	1.89
7	15	1.37	0.00		2.20	53.7
8	12	1.35	0.00		0.814	2.41
9	9.0	1.70	0.00		1.51	6.48
10	5.0	0.942	7.80		1.50	3.56

2283 *Calypptogena* 8 Außenschale

	mm	Sr/Ca*	Ba/Ca	Li	Cu/Ca	Zn/Ca
1	17	1.18	9.71	n.d.	0.630	16.8
2	13	1.42	15.2		1.73	48.0
3	10	1.40	17.9		2.46	13.9
4	6.0	1.42	0.00		11.0	106
5	2.0	1.43	2.57		6.24	23.3

2283 *Calypptogena* 8 Innenschale

	mm	Sr/Ca*	Ba/Ca	Li	Cu/Ca	Zn/Ca
1	20	1.21	14.6	n.d.	0.535	4.83
2	17					
3	14	1.18	0.00		0.00	7.12
4	11	1.15	0.00		0.0423	1.32
5	8.0	1.24	7.78		0.908	3.89
6	5.0	1.16	2.76		0.597	0.708

B. PERU

I. Chiclayo

33 *Calyptogenia* Außenschale

	mm	Ba/Ca	Li/Ca	Cu/Ca	Zn/Ca
1	1.0	19.3	7.11	11.1	30.7
2	5.0	14.5	6.61	5.21	7.63
3	8.0	33.8	5.70	2.12	3.68
4	11	16.5	6.11	3.03	3.62
5	14	14.9	7.78	0.281	1.70
6	16	13.8	7.03	1.31	1.92
7	18	27.4	9.51	3.00	2.80
8	22	24.7	11.0	1.45	3.31
9	25	24.7	8.74	1.41	4.73
10	29	24.4	8.71	0.726	3.41
11	33	14.4	9.41	3.41	5.64
12	39	15.8	6.12	1.37	1.98
13	42				
14	48	42.8	6.04	0.198	1.09
15	53	15.2	3.71	1.17	2.94
16	58	45.2	7.01	1.64	4.60
17	61	17.5	3.95	0.886	1.44
18	64	18.7	6.01	3.32	3.01

	mm	δ 13C	δ 18O
1	2.0	-0.820	3.21
2	5.0	-0.920	3.09
3	9.0	-0.590	3.41
4	13	-0.720	3.77
5	17	-0.470	3.45
6	20	-0.470	3.39
7	23	-0.210	3.33
8	27	0.00	3.39
9	30	-0.100	3.47
10	32	0.0700	3.60
11	35	-0.170	3.28
12	38	-0.180	3.45
13	40	-1.03	3.13
14	45	-1.74	2.96
15	48	-1.73	2.92
16	51	-0.710	3.26
17	54	-0.400	3.30
18	56	-0.580	3.40
19	60	-0.620	3.49
20	62	-0.640	3.68

33 *Calyptogena* Innenschale

	Probe	Sr/Ca*	Ba/Ca	Li/Ca	Cu/Ca	Zn/Ca
1	2.0	0.416	33.2	8.14	7.91	6.72
2	3.0	0.612	53.4	7.61	6.59	6.81
3	4.0	0.792	46.9	9.49	6.01	6.42
4	5.0	0.887	31.2	11.7	10.1	6.10
5	6.0	0.744	19.6	7.77	4.89	3.26
6	8.0	0.887	12.9	5.77	2.23	1.61
7	9.0	0.908	57.9	7.33	15.7	12.2
8	10	1.02	34.9	9.29	1.95	2.59
9	11	0.999	18.8	10.6	0.985	2.84
10	12	0.818	14.3	11.2	0.232	5.73
11	13	0.726	27.7	8.62	0.00	1.10
12	14	0.808	30.3	8.67	0.379	6.37
13	15	0.829	13.8	4.58	0.357	5.46
14	17	0.955	14.6	8.36	0.840	3.05

33/1 Serpulide

	Probe	Sr/Ca*	Ba/Ca	Li/Ca	Cu/Ca	Zn/Ca
1	1.0	2.93	28.200	12.3	5.1400	19.000
2	2.0	3.54	52.133	22.8	2.0460	
3	3.0	2.83	50.752	21.3	2.8438	18.644
4	4.0	3.54	45.338	22.6	3.0952	
5	5.0	2.96	38.998	20.7	3.4792	21.611
6	6.0	3.96	55.446	22.0	2.9509	
7	7.0	3.37	26.524	23.2	2.8367	27.246
8	8.0	5.13	40.229	26.7	2.4394	
9	9.0	3.14	29.470	19.6	5.5282	20.237
10	10	4.55	59.949	16.8	2.1509	
11	11	3.00	22.663	20.9	1.9058	27.238
12	12	3.85	35.878	19.4	3.0689	
13	13	2.82	17.152	18.3	4.3769	43.106

	Probe	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{18}\text{O}$
1	1.0	-4.46	3.65
2	2.0	-4.80	3.52
3	3.0	-2.44	3.63
4	4.0	-4.33	3.69
5	5.0	-4.80	3.67
6	6.0	-5.61	3.62
7	7.0	-6.23	3.54
8	8.0	-6.42	3.47
9	9.0	-4.81	3.58
10	10	-5.27	3.46
11	11	-6.65	3.44
12	12	-7.30	3.44
13	13	-7.93	3.48

33/2 Serpulide

	Probe	Sr/Ca*	Ba/Ca	Li/Ca	Cu/Ca	Zn/Ca
1	1	3.05	84.0	0.00	6.51	79.1
2	2	3.59	0.00	0.00	7.24	56.6
3	3	3.24	7.44	0.00	4.89	48.5
4	4	3.37	14.7	0.00	6.14	29.1
5	5	2.91	0.00	0.00	11.0	143
6	6	3.13	37.7	0.00	3.71	23.6
7	7	3.03	10.0	0.00	5.51	56.0
8	8	3.13	32.8	2.40	3.38	22.8
9	9	2.89	20.5	5.47	2.92	23.2
10	10	3.16	27.8	6.92	2.61	24.2
11	11	3.05	6.82	10.3	4.63	53.4
12	12	3.29	34.1	16.6	5.59	79.1
13	13	2.91	130	11.6	250	71.9
14	14	3.12	25.2	7.44	4.59	39.7
15	15	2.94	14.9	11.0	8.48	46.8
16	16	3.21	13.6	8.07	2.52	36.9
17	17	2.90	8.16	9.69	3.92	26.2
18	18	3.23	13.7	10.7	3.02	31.2

II. Paita

30 *Calyptrigena*

	mm	Sr/Ca*	Ba/Ca	Li/Ca	Cu/Ca	Zn/Ca
1	3.0	1.24	40.2	10.6	3.39	13.0
2	6.0	1.13	19.5	8.29	3.65	5.43
3	9.0	0.833	21.9	8.62	2.41	6.33
4	13	0.892	29.4	12.9	6.60	13.6
5	16	1.07	23.7	6.21	1.91	1.89
6	18	1.05	16.6	4.56	1.55	1.84
7	20	1.06	16.1	5.95	1.42	3.38
8	22	1.19	15.7	6.96	1.90	2.07
9	25	1.18	15.5	6.75	1.58	48.5
10	27	1.09	14.9	6.65	2.54	12.5
11	30	0.974	15.8	5.38	2.24	4.43
12	32	0.951	15.4	4.54	1.81	2.89
13	35	1.07	14.0	5.34	2.11	7.62

30 *Serpulide*

	Probe	Sr/Ca*	Ba/Ca	Li/Ca	Zn/Ca	Cu/Ca
1	1.0	2.96	14.2	13.0	47.8	6.69
2	3.0	3.19	19.5	11.6	66.8	14.6
3	4.0	3.50	36.3	13.7	54.5	5.14
4	5.0	3.03	16.3	14.8	68.6	11.3
5	6.0	3.17	30.3	11.0	42.6	3.80
6	7.0	3.00				9.62
7	8.0	3.17	30.3	10.3	37.8	4.49
8	9.0	3.31	10.8	16.2	66.0	9.17
9	10	4.00	109	25.9	129	6.92
10	11	3.05	24.0	15.0	56.0	8.88
11	12	3.20	29.2	12.7	49.7	6.30
12	13	3.09	26.0	13.0	80.7	7.90
13	14	3.14	26.0		45.8	4.90

	Probe	δ 13C	δ 18O
1	1.0	-5.63	3.55
2	2.0	-3.57	3.59
3	3.0	-4.61	3.46
4	4.0	-5.09	3.45
5	5.0	-4.21	3.44
6	6.0	-4.23	3.51
7	7.0	-5.70	3.43
8	8.0	-3.61	3.45
9	9.0	-4.32	3.42
10	10	-5.50	3.42
11	11	-5.25	3.54
12	12	-3.18	3.52
13	13	-5.99	3.43
14	14	-5.82	3.36

177 *Calypptogena* 1

	mm	Sr/Ca*	Ba/Ca	Li/Ca	Cu/Ca	Zn/Ca
1	2.0	1.60	204	16.1	18.2	14.3
2	4.0	1.31	22.6	3.57	1.30	2.56
3	7.0	1.43	17.8	3.51	1.74	3.26
4	9.0	1.37	0.00	5.53	2.19	4.22
5	11	1.38	0.00	3.36	1.81	0.665
6	13	1.31	15.6	3.09	3.91	5.28
7	15	1.47	9.89	5.09	2.05	1.45
8	17	1.45	11.7	4.16	2.83	0.932
9	20	1.49	12.0	4.75	4.10	7.01
10	22	1.54	36.9	8.77	3.30	4.71
11	24	1.51	27.1	9.67	1.88	9.64
12	26	1.50	0.00	9.36	3.69	9.39
13	28	1.49	0.00	2.90	3.21	12.6
14	31	1.72	0.00	8.02	4.56	25.2
15	34	1.49	11.8	5.82	3.48	1.56
16	37	1.30	7.83	7.91	3.81	

177 *Calypptogena* 2

	mm	Sr/Ca*	Ba/Ca	Li/Ca	Cu/Ca	Zn/Ca
1	3.0	3.00	1.92	0.00	1.23	2.66
2	5.0	4.29	1.79	0.00	2.08	8.79
3	7.0	5.42	2.11	4.56	1.04	1.16
4	9.0	5.62	1.49	1.68	0.828	2.71
5	12	5.47	1.04	0.160	1.50	2.48
6	15	4.99	0.745	0.00	1.79	6.51
7	17	6.13	1.88	4.22	0.953	2.57
8	19	5.27	2.50	2.03	0.532	3.79
9	20	5.25	2.77	0.00	0.742	6.33
10	22	2.38	4.18	0.00	1.68	11.2
11	25	5.06	2.08	13.7	1.11	3.37
12	27		3.99	0.00	2.15	29.3
13	29	2.47	2.77	6.24	1.07	8.57
14	33	5.63	6.73	55.1	8.35	40.2
15	40	5.55	4.94	18.9	7.06	17.6
16	42	6.49	3.08	0.689	0.00	2.01
17	43	5.03	3.11	6.42	0.364	5.31
18	46	4.97	4.11	0.00	0.00	10.8
19	51		5.14	157	0.00	185
20	54	4.87	1.17	38.7	0.00	10.5
21	55	5.86	12.1	32.6	0.00	2.65

177 *Solemya* 1

	mm	Sr/Ca*	Ba/Ca	Li/Ca	Cu/Ca	Zn/Ca
1	12	6.26		0.00	23.3	29.7
2	15	7.80	70.3	84.0	20.4	24.5
3	18	8.88	166	115	134	124
4	21	6.05	76.4	43.1	42.3	18.7
5	24	5.56	51.8	17.9	18.6	5.18
6	28	5.48	33.3	6.79	12.8	5.72
7	32	5.31	5.37	0.00	7.19	5.23
8	36	5.47	11.9	0.00	14.1	23.8
9	39	6.12	6.03	4.99	4.81	17.2
10	46	5.97	2.60	0.00	2.33	2.62
11	50	5.98	2.47	0.00	2.60	3.15
12	53	6.78	3.67	0.00	2.45	1.40
13	55	6.52	3.32	0.00	1.97	1.67
14	57	5.91	5.25	6.14	2.12	1.82
15	60	4.90	3.12	0.00	2.61	5.13

177 *Solemya* 2

	mm	Sr/Ca*	Ba/Ca	Li/Ca	Zn/Ca
1	10	6.53	8.58	0.00	11.0
2	12	6.78	26.9	0.823	4.59
3	17	7.33	23.1	2.88	1.78
4	20	7.33	37.7	1.73	0.439
5	23	7.05	36.5	1.98	1.41
6	26	6.87	60.3	1.70	3.07
7	29	6.89	33.8	2.03	0.981
8	34	6.61	36.5	2.20	0.870
9	36	5.09	22.1	4.46	0.180

III. Chimbote

8506 *Calypptogena* 1

	mm	Ba/Ca	Li/Ca	Cu/Ca	Zn/Ca	Cd/Ca
1	50	43.6	1.11	24.6	315	1.26
2	47	38.7	2.05	13.3	135	0.451
3	44	35.2	0.602	8.32	191	0.0837
4	42	33.0	1.11	7.71	68.5	0.0515
5	39	48.7	1.04	6.15	56.2	0.0215
6	34	73.4	0.00	6.73	85.5	0.0726
7	23	23.9	1.08	3.73	28.9	0.0363
8	17	17.7	0.612	2.96	20.6	0.0189
9	13	20.1	0.00	3.00	22.9	
10	9.0	14.2	1.10	3.39	9.89	
11	5.0	12.4	0.0625	2.45	4.60	
12	2.0	13.8	1.57	3.62	4.69	

8506 *Calypptogena* 2 Außenschale

	mm	Sr/Ca*	Ba/Ca	Li/Ca	Cu/Ca	Zn/Ca
1	6.0	4.97	11.7	8.90	4.97	8.90
2	8.0	2.89	8.49	79.4	2.89	79.4
3	14	2.61	7.99	6.75	2.61	6.75
4	19	2.52	5.80	9.27	2.52	9.27
5	23	2.76	7.51	17.2	2.76	17.2
6	26	2.84	7.96	4.28	2.84	4.28
7	30	3.63	8.67	7.27	3.63	7.27
8	33	2.35	5.65	5.37	2.35	5.37
9	37	2.51	10.9	6.53	2.51	6.53
10	41	3.36	9.10	6.95	3.36	6.95
11	48	2.30	9.10	6.79	2.30	6.79
12	51	3.05	8.32	8.81	3.05	8.81
13	55		8.76	6.59		6.59
14	62		9.53	7.75		7.75
15	65		14.9	9.56		9.56
16	66		13.1	8.47		8.47
17	70		16.8	10.2		10.2
18	73		10.2	7.02		7.02
19	77		10.6			

	mm	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{18}\text{O}$
1	6.0	0.0349	0.328
2	8.0	0.0248	0.255
3	14	0.0481	0.328
4	19	0.0721	0.400
5	23	0.0612	0.473
6	26	0.0321	0.255
7	30	0.0433	0.364
8	33	0.0605	0.328
9	37	0.0346	0.328
10	41	0.0353	0.255
11	48	0.0311	0.255
12	51	0.0445	0.291
13	55	0.0626	0.473
14	62	0.0540	0.400
15	65	0.0304	0.328
16	66	0.0363	0.328
17	70	0.0188	0.218
18	73	0.0463	0.328
19	77	0.0474	0.328

8506 *Calyptogena* 2 Innenschale

	mm	Sr/Ca*	Ba/Ca	Li/Ca	Cu/Ca	Zn/Ca
1	1.0	2.89	3.28	9.35	8.33	71.6
2	3.0		2.06	12.0	3.49	
3	6.0		1.71	10.3	1.55	
4	8.0	0.726	3.68	20.6	3.49	11.5
5	14	0.0840	2.81	14.3	1.59	1.52
6	19		2.43	7.78	1.65	
7	23	0.420	3.46	15.2	2.85	7.93
8	26	0.0981	2.46	9.12	1.23	1.74
9	30	0.0769	2.34	11.0	1.02	1.43
10	33	4.24	6.31	11.1	4.38	29.2
11	37	0.226	4.03	5.60	1.49	2.44
12	41		3.75	12.9	1.32	
13	48	0.121	2.84	12.6	1.27	2.17
14	51		3.41	13.2	2.24	
15	55	0.344	4.19	15.2		3.57
16	62	0.180	3.04	10.2	5.08	3.00
17	65	0.278	2.89	11.1	2.58	4.88
18	66	0.0610	1.74	7.84	2.10	1.78
19	70	0.0990	2.04	10.6	2.14	2.81
20	73	0.0783	1.73	8.06	1.57	2.97
21	77	0.300	2.33	5.68	10.3	6.54

	mm	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{18}\text{O}$
1	8.0	0.140	3.91
2	23	-0.370	3.66
3	33	-0.900	3.59
4	51	-4.57	2.54
5	65	-3.75	2.92
6	70	-2.97	3.07

163 *Solemya* 1

	mm	Sr/Ca*	Ba/Ca	Li/Ca	Cu/Ca	Zn/Ca
1	6.0	3.67	7.01	5.76	9.65	7.65
2	10	4.08	9.74	8.64	5.87	4.15
3	13	4.03	5.61	7.2	1.89	
4	16	4.38	14.3	14.5	2.80	1.15
5	18	4.34	13.1	14	2.89	0.984
6	20	4.44	15.4	15	2.45	3.97
7	23	1.78	19.7	8.13	0.866	2.90

	mm	∂ 13C	∂ 18O
1	26	1.05	4.10
2	34	-0.760	3.89
3	31	0.740	3.74
4	18	0.350	3.22
5	15	1.31	3.60
6	13	2.88	3.45
7	11		
8	9.0	2.11	3.61
9	4.0	3.34	3.24
10	2.0		

163 *Solemya* 2

	mm	Sr/Ca*	Ba/Ca	Li/Ca	Cu/Ca	Zn/Ca
1	12	5.69	30.8	0.00	79.1	128
2	15	5.37	28.7	4.15	19.6	43.3
3	18	6.81	32.7	0.00	36.5	47.7
4	25	5.57	25.2	3.63	11.5	26.4
5	27	5.81	26.5	2.37	25.6	31.4
6	30	4.68	24.7	4.36	6.31	10.3
7	32	7.28	36.9	3.56	3.98	5.78
8	35	6.27	29.5	3.19		20.9
9	38	5.84	29.5	2.34		6.98
10	40	5.37	25.2	3.42		13.9
11	46	4.67	22.2	4.04		4.16

163 Serpulide

	Probe	Sr/Ca*	Ba/Ca	Li/Ca	Cu/Ca	Zn/Ca
1	1.0	2.94	65.4	24.300	3.24	26.1
2	2.0	3.13	18.8	27.013	1.61	
3	3.0	3.02	80.5		2.24	36.7
4	4.0	3.00	15.4	10.245	2.26	
5	6.0	3.18	31.5	5.7629	1.66	
6	7.0	2.90	34.2	13.476	2.83	37.9
7	8.0	3.12	19.6	12.835	1.95	
8	9.0	3.22	38.6	14.207	3.37	47.4
9	10	3.13	28.2	11.406	2.54	
10	11	2.95	27.8	13.224	2.62	41.6
11	12	3.10	24.7	13.927	1.89	

	Probe	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{18}\text{O}$
1	1.0	-4.36	3.46
2	2.0	-6.12	3.51
3	3.0	-4.57	3.60
4	4.0	-5.52	3.71
5	5.0	-6.08	3.56
6	6.0	-6.25	3.65
7	7.0	-5.26	3.65
8	8.0	-6.17	3.72
9	9.0	-6.80	3.71
10	10	-8.77	3.55
11	11	-6.18	3.60
12	12	-6.07	3.62

DANKSAGUNG

Die vorliegende Arbeit ist am GEOMAR - Forschungszentrum für marine Geowissenschaften, Abteilung Marine Umweltgeologie entstanden. Herrn Prof. Dr. Erwin Suess danke ich für die frei gestaltbare Aufgabenstellung, für Inspiration und fachliche Begleitung der Arbeit.

Die Arbeit beruht auf Probenmaterial, das auf verschiedenen Forschungsfahrten gewonnen wurde. Dabei hatten Tauchbooteinsätze einen besonderen Stellenwert. Im Herbst 1993 hatte ich die Möglichkeit persönlich an mehreren Tauchgängen teilzunehmen. Für diese aufregende Erfahrung danke ich Prof. Dr. Erwin Suess und Prof. Dr. Bobb Carson (Lehigh University, USA).

Die Arbeit wurde im Rahmen der BMFT-Forschungsvorhaben "Plattenrand 03R607" und "PeruVent 03R418" angefertigt; die DFG ermöglichte die Teilnahme an der *Alvin*-Tauchfahrt durch das Vorhaben "Fluidchemie Schl 369/1-1". Für die großzügige finanzielle Unterstützung sei an dieser Stelle gedankt.

Dr. Helmut Erlenkeuser (^{14}C -Labor, Kiel) danke ich für die Durchführung der Isotopenanalysen, sowie für hilfreiche Diskussionen.

Prof. Dr. Hans J. Flügel (Institut für Meereskunde, Kiel) und Prof. Dr. Eve C. Southward (Marine Biological Association, Plymouth, U.K.) danke ich für die wertvolle Aufklärung über *Pogonophora* und *Vestimentifera*.

Für die Einweisung in die Feinstrukturanalyse von Muschelschalen danke ich Prof. Dr. Harry Mutvei und Elena Dunca (beide Naturhistorisk Riksmuseet, Stockholm, Schweden).

Allen Mitgliedern der Abteilung Marine Umweltgeologie danke ich für größere und kleinere Hilfestellungen und Diskussionen.

Ein besonderer Dank gilt meiner Familie und meinen Freunden für stetes Interesse, immerwährende Hilfsbereitschaft und "seelischen Beistand", der mir in allen Situationen den Fortgang der Arbeit ermöglicht hat.